

EMPIR JRP 18RPT03 MetForTC

WORKSHOP – Temperature measurement by thermocouples, new devices and methods

Osnovni principi mjerenja temperature termoparovima i pripadne mjerne nesigurnosti

Danijel Šestan



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
*University of Zagreb
Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture*



Laboratorij za procesna mjerenja
Laboratory for Process Measurement
Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, Hrvatska
Tel: +385 1 6168330
e-mail: lpm@fsb.hr, www.fsb.hr

30. ožujak 2022.

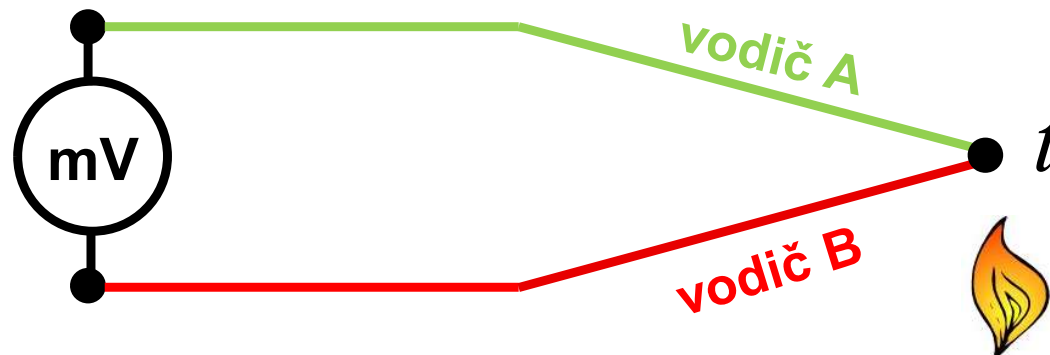
Termoparovi - princip rada

Termoparovi su najzastupljeniji osjetnici temperature u industriji.

U upotrebi su još od 1821. godine, kada je Thomas Joma Seebeck otkrio termoelektrični efekt.

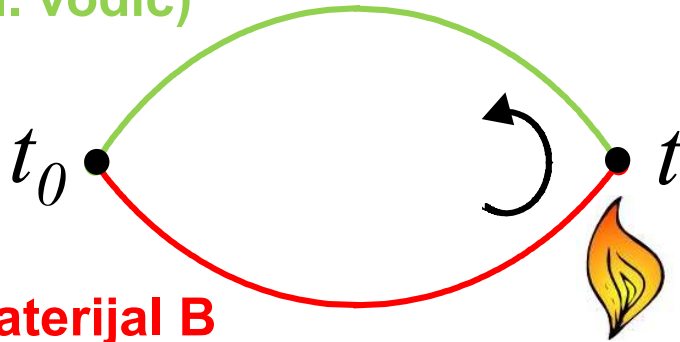
Sastavljeni su od dvaju metalnih vodiča koji su spojeni na jednom kraju.

Zagrijavanjem spoja generira se električni napon između slobodnih krajeva vodiča, što se može iskoristiti za mjerenje temperature.



Termoparovi - princip rada

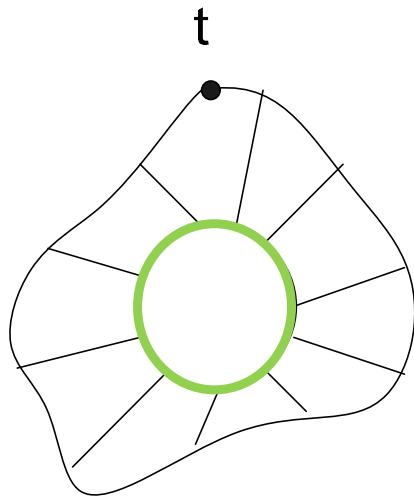
materijal A
(el. vodič)



materijal B
(el. vodič)

Termoelektromotorna sila je funkcija temperature

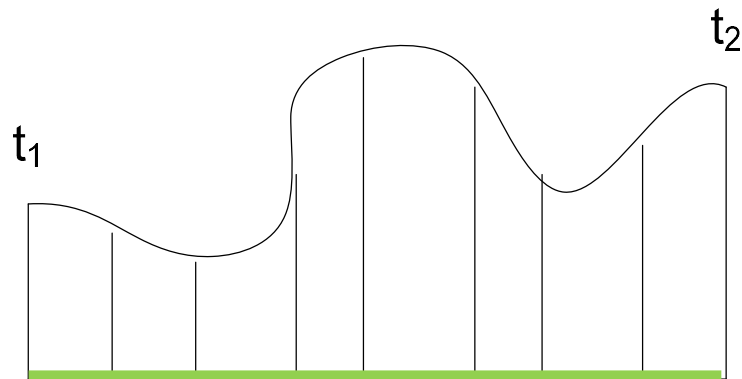
$$e_{AB} = f(t)$$



Termoelektromotorna sila u zatvorenom vodiču jednaka je nuli

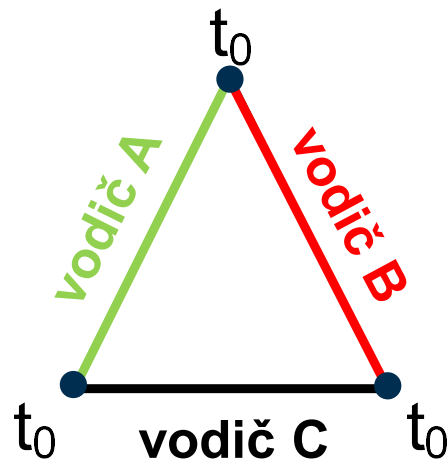
$$e = \int_t^t de = \int_t^t df(t) = f(t) - f(t) = 0$$

Termoparovi - princip rada



Termoelektromotorna sila u otvorenom homogenom vodiču ovisi jedino o temperaturama njegovih krajeva.

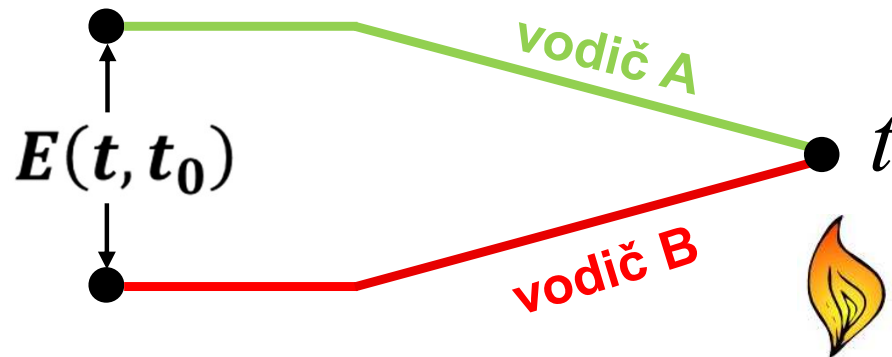
$$e = \int_{t_1}^{t_2} de = \int_{t_1}^{t_2} df(t) = f(t_2) - f(t_1)$$



Ukoliko su temperature spojeva triju međusobno povezanih vodiča jednake, termoelektromotorna sila će biti jednaka nuli.

$$e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$$

Termoparovi - princip rada



$$E(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0)$$

↓
termonapon

$$e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$$

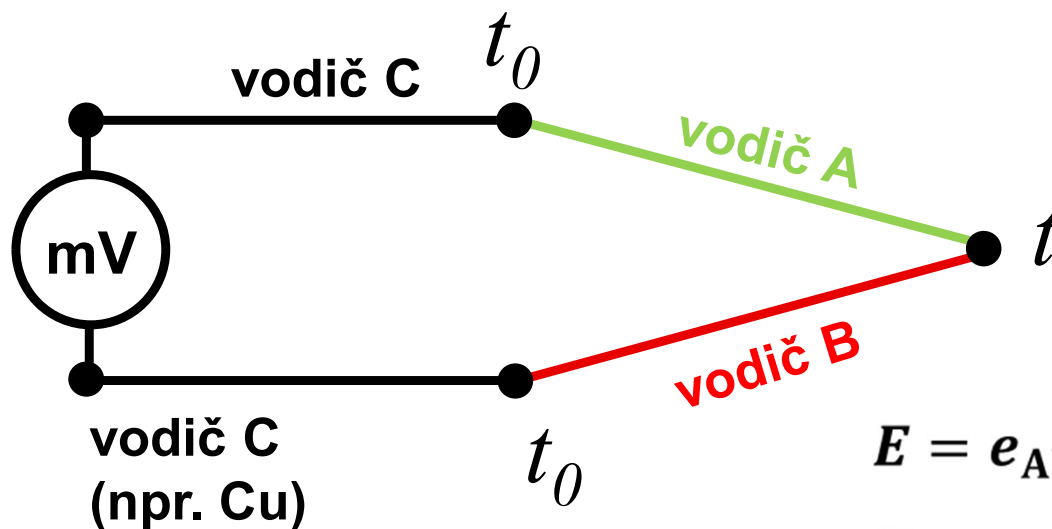
$$E(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

$E(t, t_0)$ -> funkcija od:

- t (mjerimo)
- t_0 (moramo znati)
- A, B (materijala vodiča)

Termoparovi - princip rada

- Ukoliko se između dvaju vodiča (A i B) u termoparskom spoju ubaci treći vodič (C, npr. Cu), on neće imati utjecaj na generirani termonapon, pod pretpostavkom da su oba spoja (CA i CB) na istoj temperaturi (t_0)
 - termopar je moguće lemiti
 - termopar je moguće spojiti na milivoltmetar s bakrenim priključnim vodovima - pritom je potrebno osigurati da mjesta priključaka termopara na bakrene vodove/spojnice budu na istim temperaturama



$$E = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0)$$

$$e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$$

$$e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0) - e_{BC}(t_0)$$

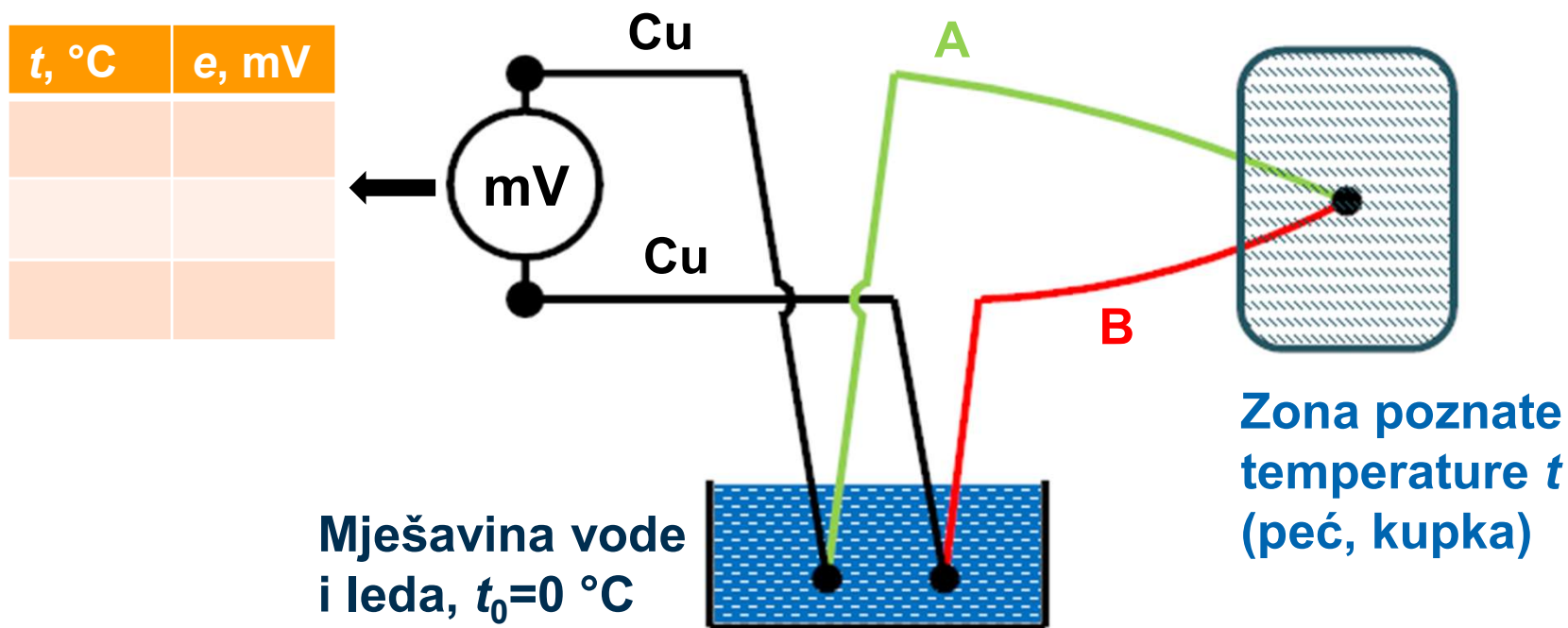
$$E = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) - e_{AB}(t_0) - e_{BC}(t_0)$$

$$E = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

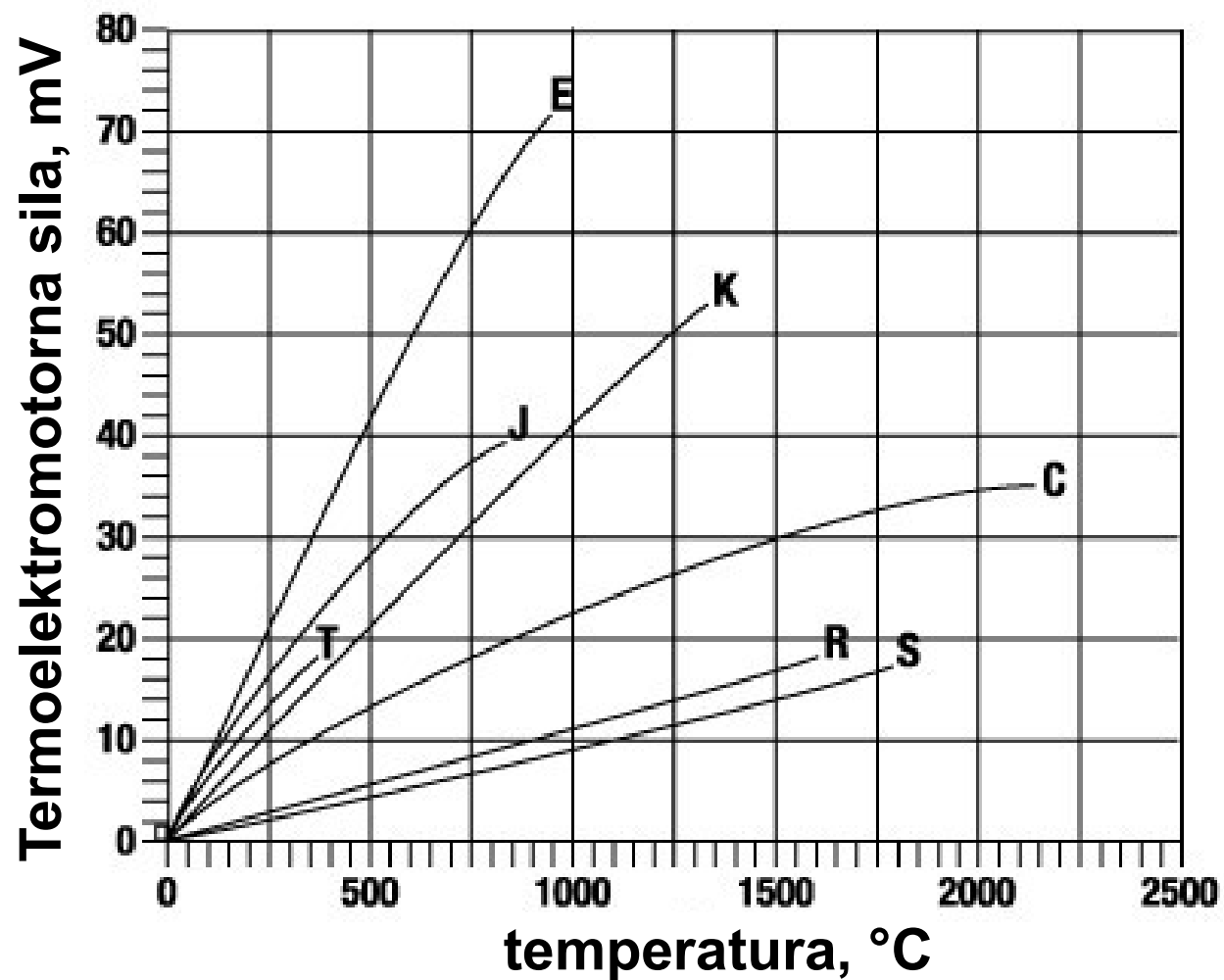
Termoparovi - određivanje karakteristike

Vrijednost termoelektromotorne sile standardnih tipova termoparova za pojedinu temperaturu određuju se iz tablica ili matematičkih izraza.

Vrijednosti u tablicama najčešće određene s hladanim krajem termopara na temperaturi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (usporedbena temperatura).



Termoparovi - karakteristike



Termoparovi - karakteristike

Primjer interpolacijskog polinoma za termopar tip K (najčešće korišten) u temperaturnom području od 0 °C do 1372 °C:

$$e = \sum_{i=1}^9 c_i \cdot (t_{90})^i + \alpha_0 \cdot e^{\alpha_1 \cdot (t_{90} - 126.9686)^2} \quad \begin{array}{l} e [\mu V] \\ t_{90} [^{\circ}C] \end{array}$$

$$c_0 = -1,760\ 041\ 368\ 6 \cdot 10^1$$

$$\alpha_0 = 1,185\ 976 \cdot 10^2$$

$$c_1 = 3,892\ 120\ 497\ 5 \cdot 10^1$$

$$\alpha_1 = -1.183\ 432 \cdot 10^{-4}$$

.

.

.

$$c_9 = -1,210\ 472\ 127\ 5 \cdot 10^{-23}$$

Termoparovi - tipovi

Standardizirani materijali za izradu termoparova

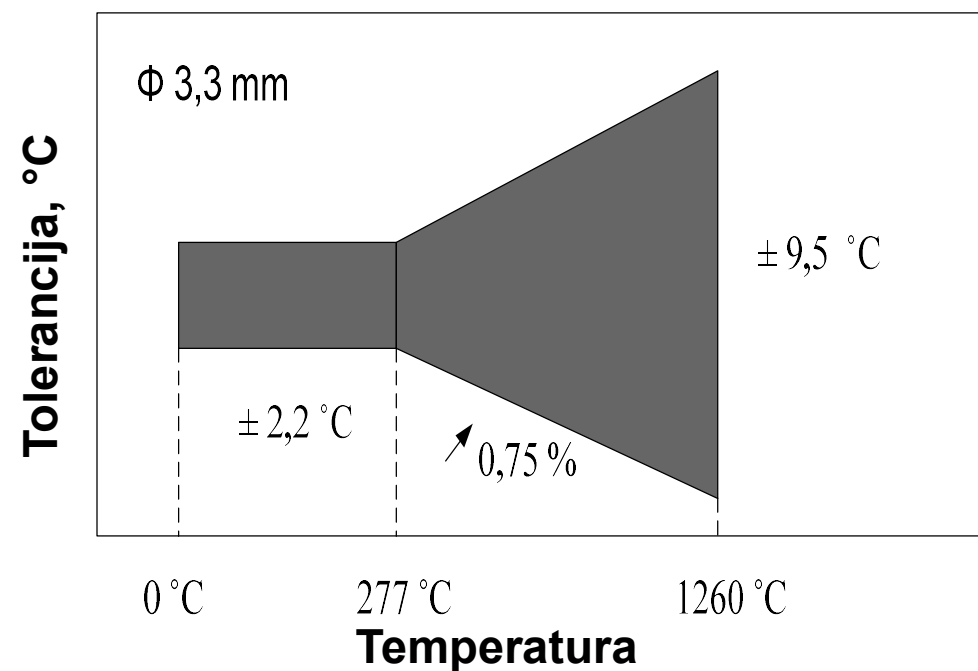
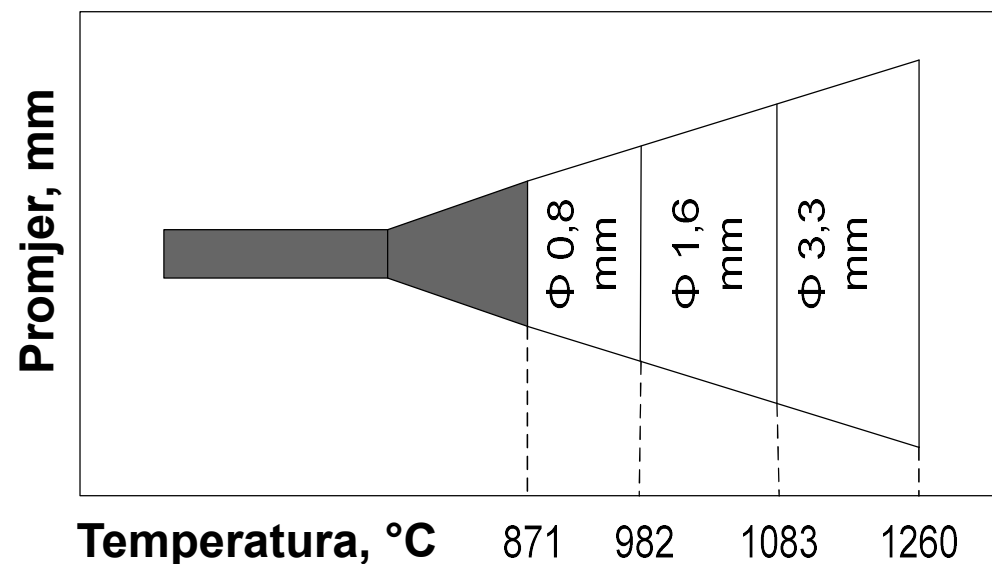
Tip (slovna oznaka)	Naziv		Oznaka bojom IEC 60584-3	Područje primjene, °C
K	Nikal-Krom Nikal	Ni-Cr/Ni	Zelena (+) Bijela (-)	-200 do 1260
T	Bakar Konstantan	Cu/konst	Smeđa (+) Bijela (-)	-200 do 371
J	Željezo Konstantan	Fe/konst	Crna (+) Bijela (-)	0 do 760
R S	Platina-Rodij Platina	Pt-Rd/Pt	Žuta (+) Bijela (-)	0 do 1480
E	Nikal-Krom Konstantan	Ni-Cr/konst	Ljubičasta (+) Bijela (-)	-200 do 900

Termoparovi - tipovi

Normirane točnosti i točnosti postizive umjeravanjem

Tip	Temp. područje, °C	Dopušteno odstupanje od standardizirane tablice	Najveća točnost postiziva umjeravanjem
K	-200 do 0 0 do 1260	$\pm 2.2 \text{ °C}$ ili $\pm 2 \%$ $\pm 2.2 \text{ °C}$ ili $\pm 0.75 \%$	--- $\pm 1.1 \text{ °C}$ ili $\pm 0.4 \%$
T	-200 do 0 0 do 370	$\pm 1.0 \text{ °C}$ ili $\pm 1.5 \%$ $\pm 1.0 \text{ °C}$ ili $\pm 0.75 \%$	--- $\pm 0.5 \text{ °C}$ ili $\pm 0.4 \%$
J	0 do 760	$\pm 2.2 \text{ °C}$ ili $\pm 0.75 \%$	$\pm 1.1 \text{ °C}$ ili $\pm 0.4 \%$
R S	0 do 1450	$\pm 1.5 \text{ °C}$ ili $\pm 0.25 \%$	$\pm 0.6 \text{ °C}$ ili $\pm 0.1 \%$
E	-200 do 0 0 do 870	$\pm 1.7 \text{ °C}$ ili $\pm 1 \%$ $\pm 1.7 \text{ °C}$ ili $\pm 0.5 \%$	--- $\pm 1.0 \text{ °C}$ ili $\pm 0.4 \%$

Termoparovi

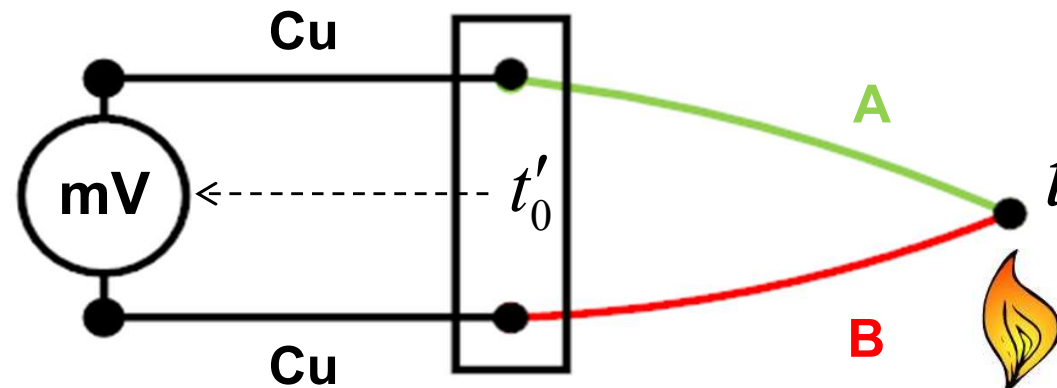


Termoparovi - usporedbena temperatura

Najtočnija mjerenja temperature postižu se postavljanjem hladnog kraja termopara u mješavinu vode i leda.

U svakodnevnoj upotrebi, spoj termopara na milivoltmetar ne ostvaruje se na temperaturi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa je potrebno kompenzirati razliku temperature mjesta spoja i usporedbene temperature $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kako bi se izvršila kompenzacija, potrebno je poznavati temperaturu spoja termoparske žice na bakreni vod (t'_0)



Termoparovi, slučaj kada $t_0 \neq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ (gotovo uvijek)

Neka je temperatura hladnog kraja $t_0' > t_0$;

$$\begin{aligned} E(t, t_0) - E(t, t_0') &= \cancel{e_{AB}(t)} - e_{AB}(t_0) - [\cancel{e_{AB}(t)} - e_{AB}(t_0')] = \\ &= e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0) \\ &= E(t_0', t_0) \end{aligned}$$

MetFerTC

$$E(t, t_0) = E(t, t_0') + E(t_0', t_0)$$

Za ovaj napon
su izrađene
tablice

Ovaj napon
mjerimo

Ovaj napon moramo dodati
izmjerenom kako bi
temperaturu mogli očitati iz
tablica

Kompenzacija zbog temperature hladnog kraja termopara različite od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_0 \neq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

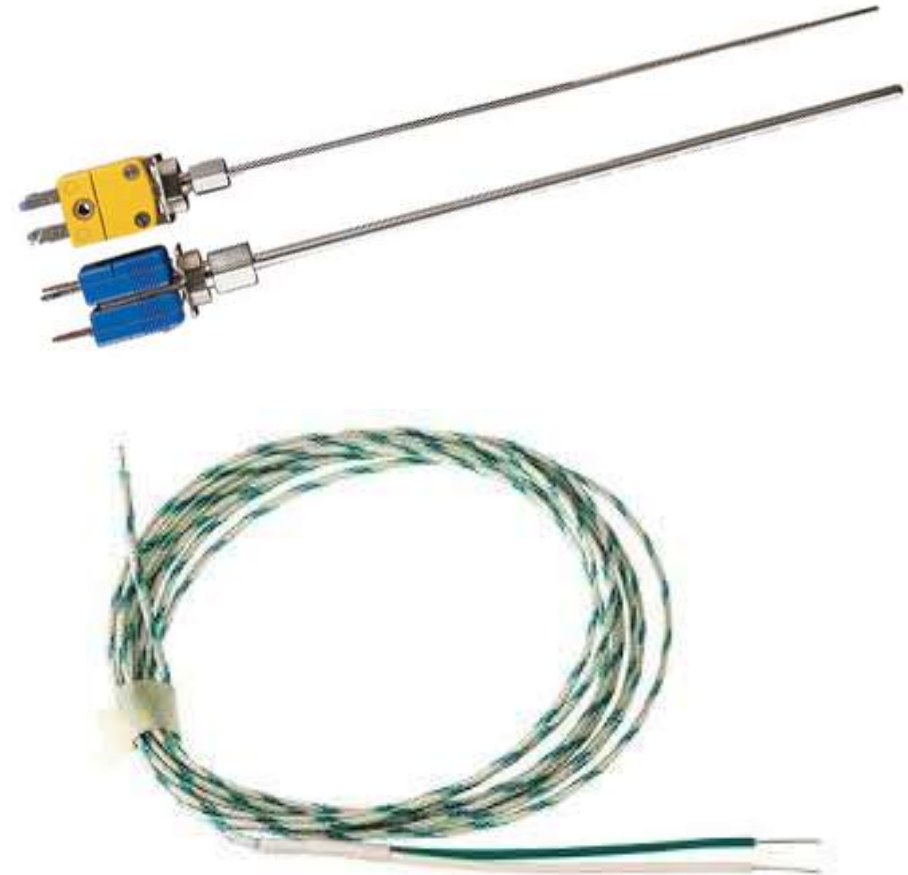
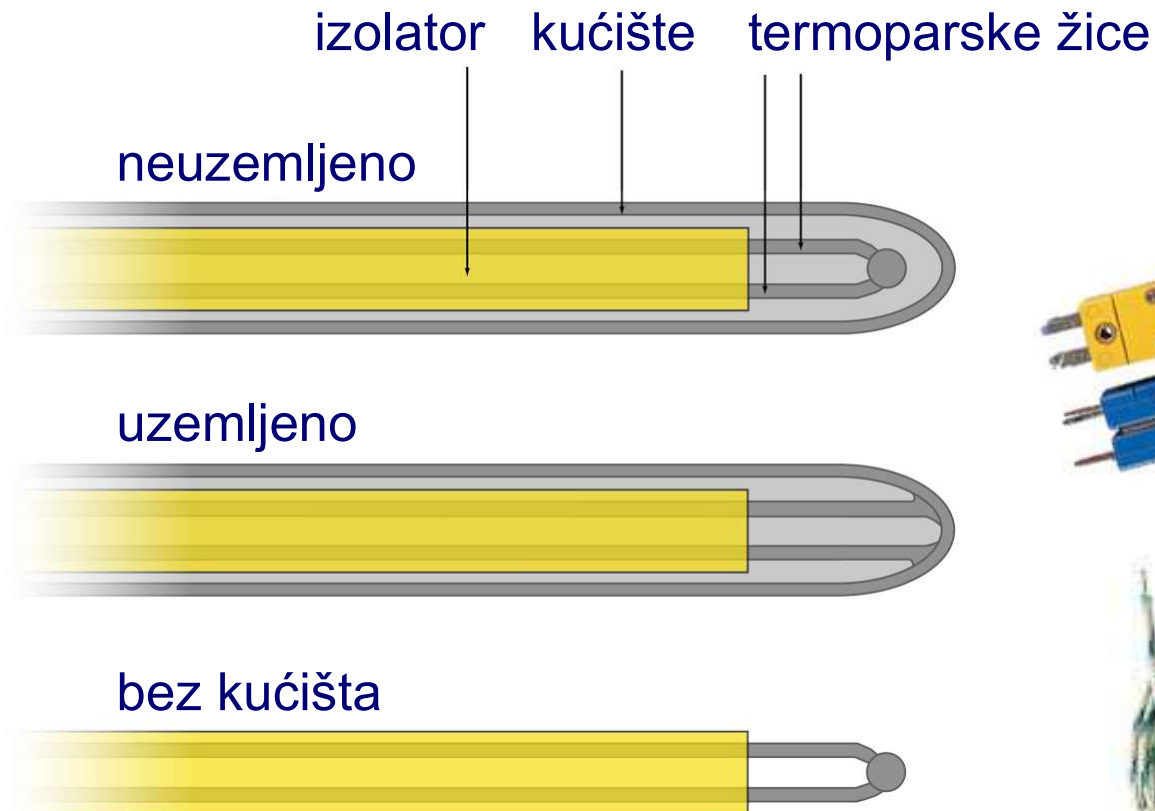
Točan proračun:

1. Milivoltmetrom mjerimo $E(t, t_0')$
2. Pomoćnim termometrom mjerimo t_0'
3. Iz tablica za termopar očitamo: $E(t_0', t_0) \rightarrow$ (za izmjereni t_0')
4. Izračunamo $E(t, t_0) = E(t, t_0') + E(t_0', t_0)$
5. Iz tablica očitamo t za izračunati $E(t, t_0)$

Okvirni proračun:

1. Milivoltmetrom mjerimo $E(t, t_0')$
2. Pomoćnim termometrom mjerimo t_0'
3. Iz tablica za termopar očitamo t' za $E(t, t_0')$
4. Izračunamo temperaturu toplog kraja termopara: $t = t' + t_0'$

Termoparovi - konstrukcija



Termoparovi - konstrukcija



Termoparovi - konstrukcija



Termoparovi



Termoparovi - prednosti i nedostaci

Prednosti

- ❑ Niska cijena
- ❑ Standardizirani i međusobno izmjenjivi
- ❑ Upotrebljivi u širokom temperaturnom rasponu (do 2600 °C)
- ❑ Mogu imati mali toplinski kapacitet (žice presjeka 0.012 mm) pa su pogodni za mjerenje brzih promjena temperature

Nedostaci

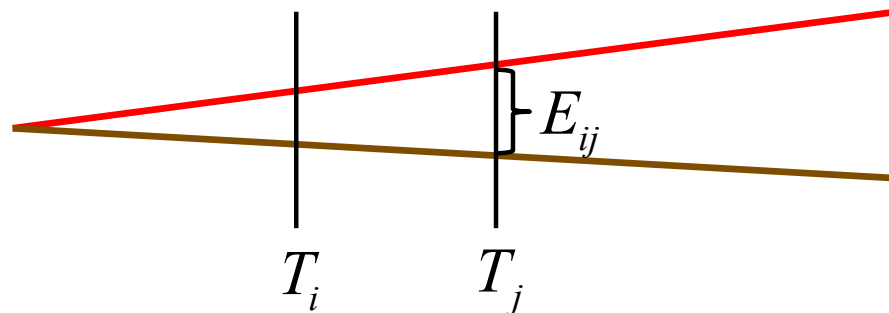
- ❑ Teško se postiže točnost veća od ± 1 °C
- ❑ Nelinearne karakteristike
- ❑ Potrebno mjerenje usporedbene temperature
- ❑ Nizak generirani napon
- ❑ Nehomogenost

Termoparovi - nehomogenost

..je abnormalna promjena Seebeckovog koeficijenta.

$$\sigma(t) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

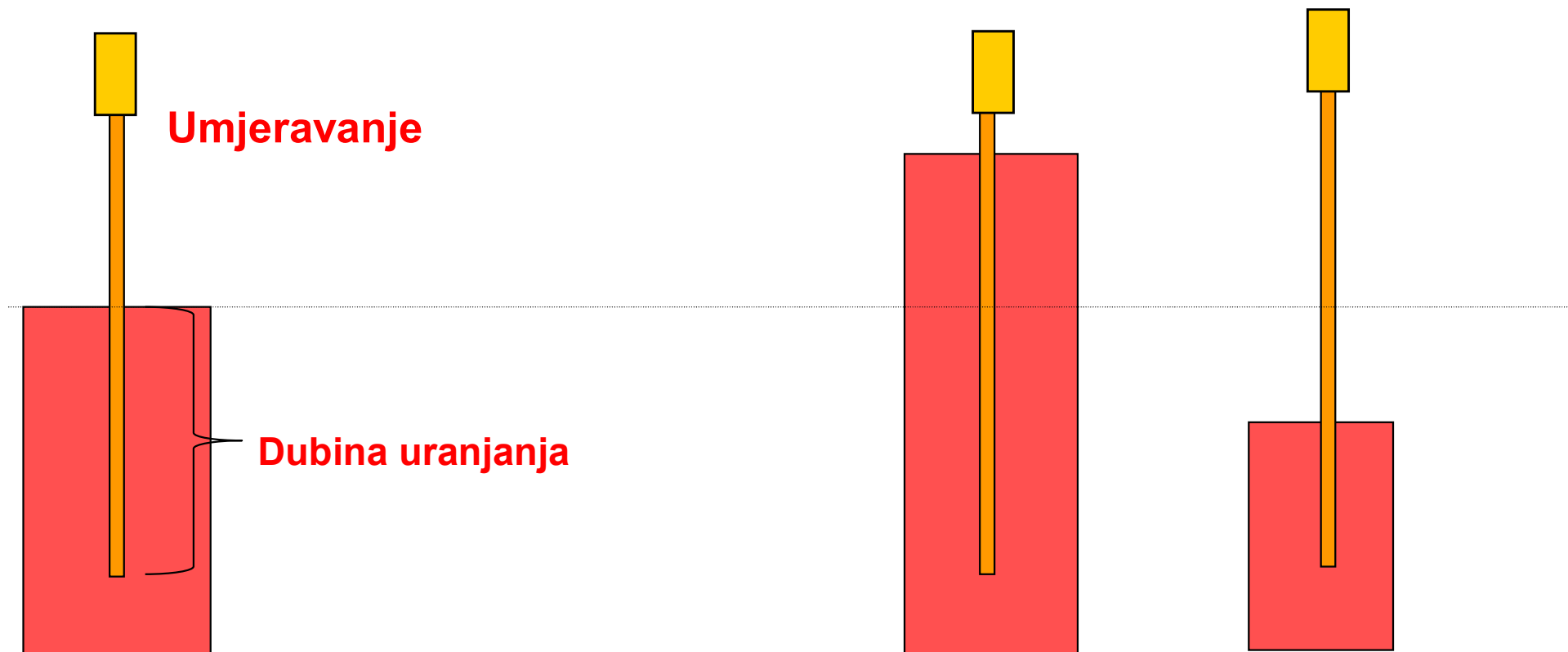
U praksi uvijek govorimo o prosječnom Seebeckovom koeficijentu za segment termoparskih žica:



$$\sigma(T_m) = \frac{E_{ij}}{T_j - T_i}$$

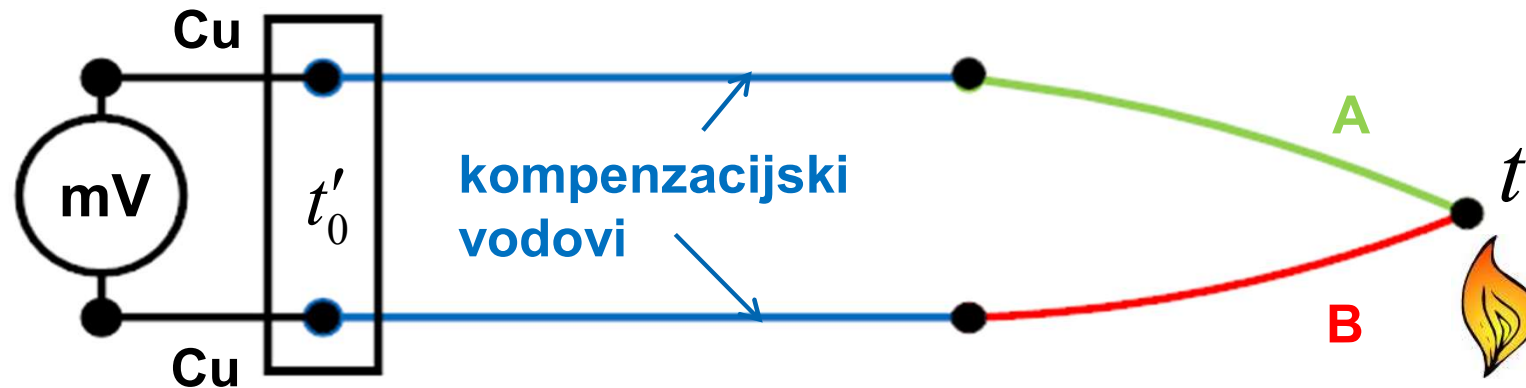
Ukupni termonapon koji mjerimo na krajevima termoparskih žica je suma svih termonapona na svim neizotermalnim segmentima žica.

Korištenje



Termoparovi - kompenzacijski vodovi

Shema spajanja termopara na milivoltmetar pomoću kompenzacijskog voda



Kompenzacijski vod se koristi:

- kada je mjesto mjerenja temperature udaljeno od pokaznog instrumenta (milivoltmetra)
- kada hladan kraj (t_0) želimo odmaknuti od izvora topline (peći)

Termoparovi - kompenzacijski vodovi

Kompenzacijski vodovi

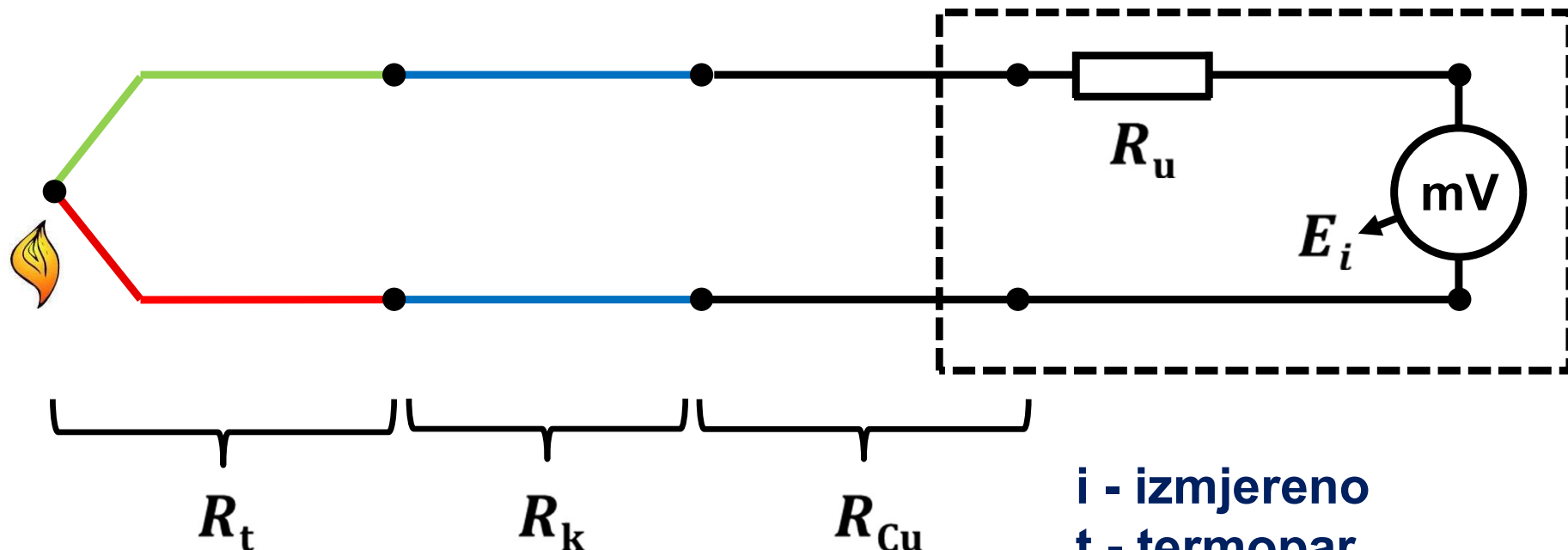
- izrađeni su od materijala kojima sastav nije jednak sastavu pripadnog termopara, ali pri temperaturama nižim od 200 °C imaju slična termoelektrična svojstva kao i termopar,
- jeftiniji su od termoparske žice
- imaju veći promjer (manji specifični električni otpor)
- fleksibilniji su (lakše se polažu u postojeće instalacije)

Produžni ili ekstenzijski vodovi (*Extension cable*)

- izrađeni su od materijala kojima je nominalni sastav jednak sastavu pripadnog termopara.

Termoparovi - mjerenje napona

Mjerenje termonapona kada se električni otpor vodova mora uzeti u obzir.

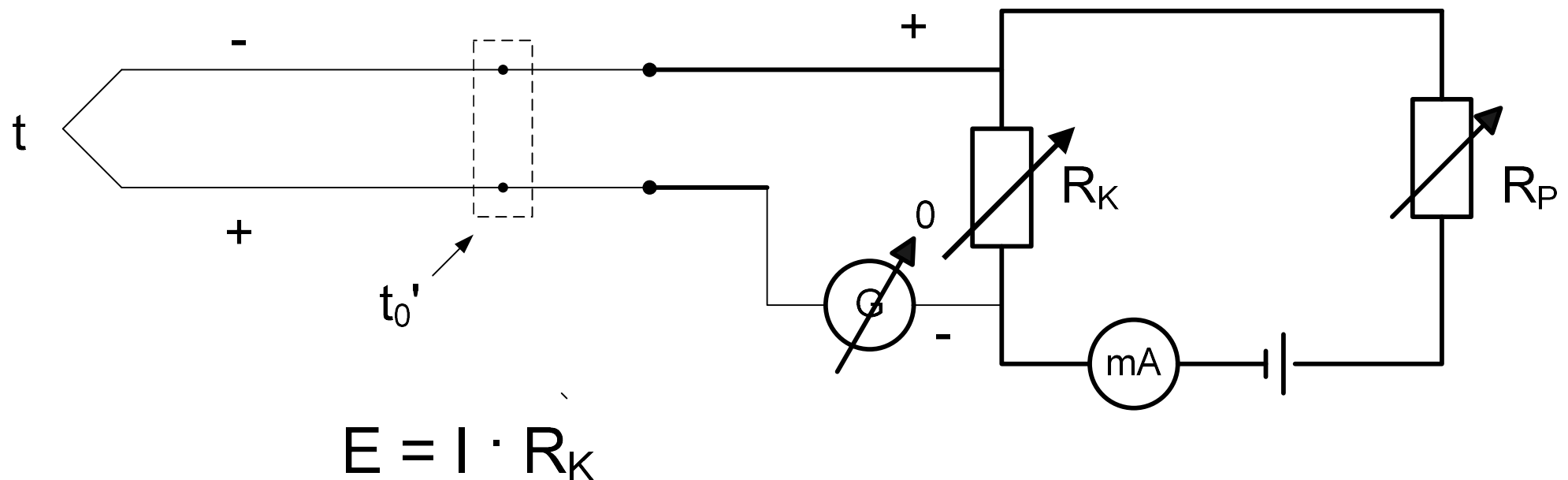


$$E_t = E_i \frac{R_t + R_k + R_{Cu} + R_u}{R_u} = k \cdot E_i$$

i - izmjereno
 t - termopar
 k - kompenzacijski vod
 Cu - bakreni vod
 Ru - unutarnji otpor milivoltmetra

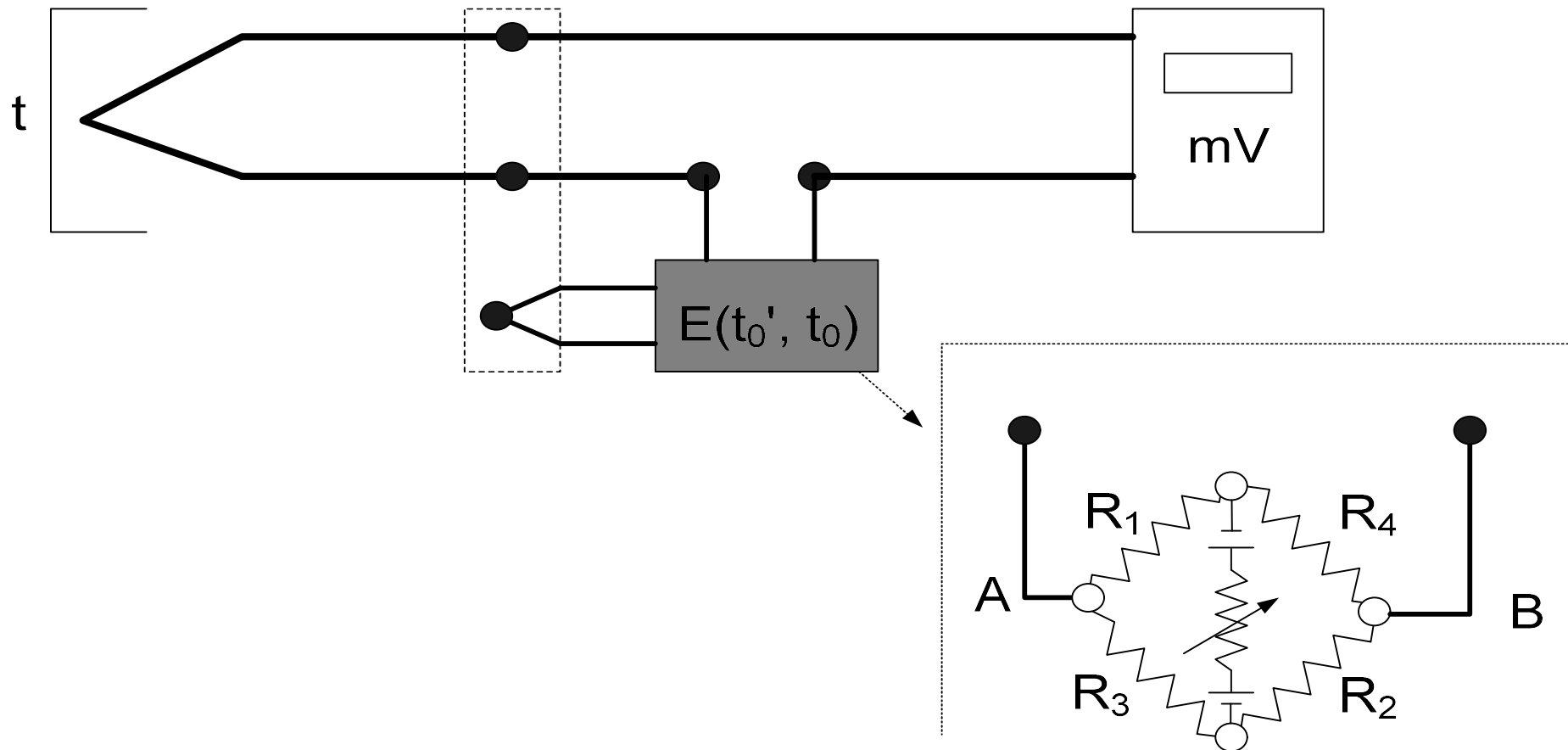
Termoparovi - mjerenje napona

Mjerenje termonapona kada se električni otpor vodova može zanemariti (metoda kompenzacije, Lindeck-Rothe most)



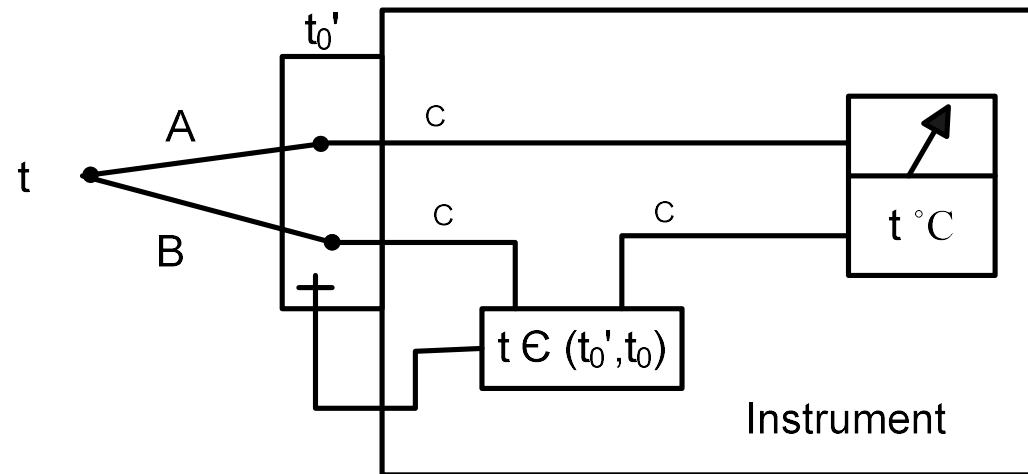
Termoparovi - mjerenje napona

Automatska kompenzacija usporedbene temperature. - poseban uređaj



Termoparovi - automatska kompenzacija

Automatska kompenzacija usporedbene temperature.
- Ugrađena u milivoltmetar



$$E = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0') + e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0) + e_{CA}(t_0');$$

$$e_{AB}(t_0') + e_{BC}(t_0') + e_{CA}(t_0') = 0 \Rightarrow$$

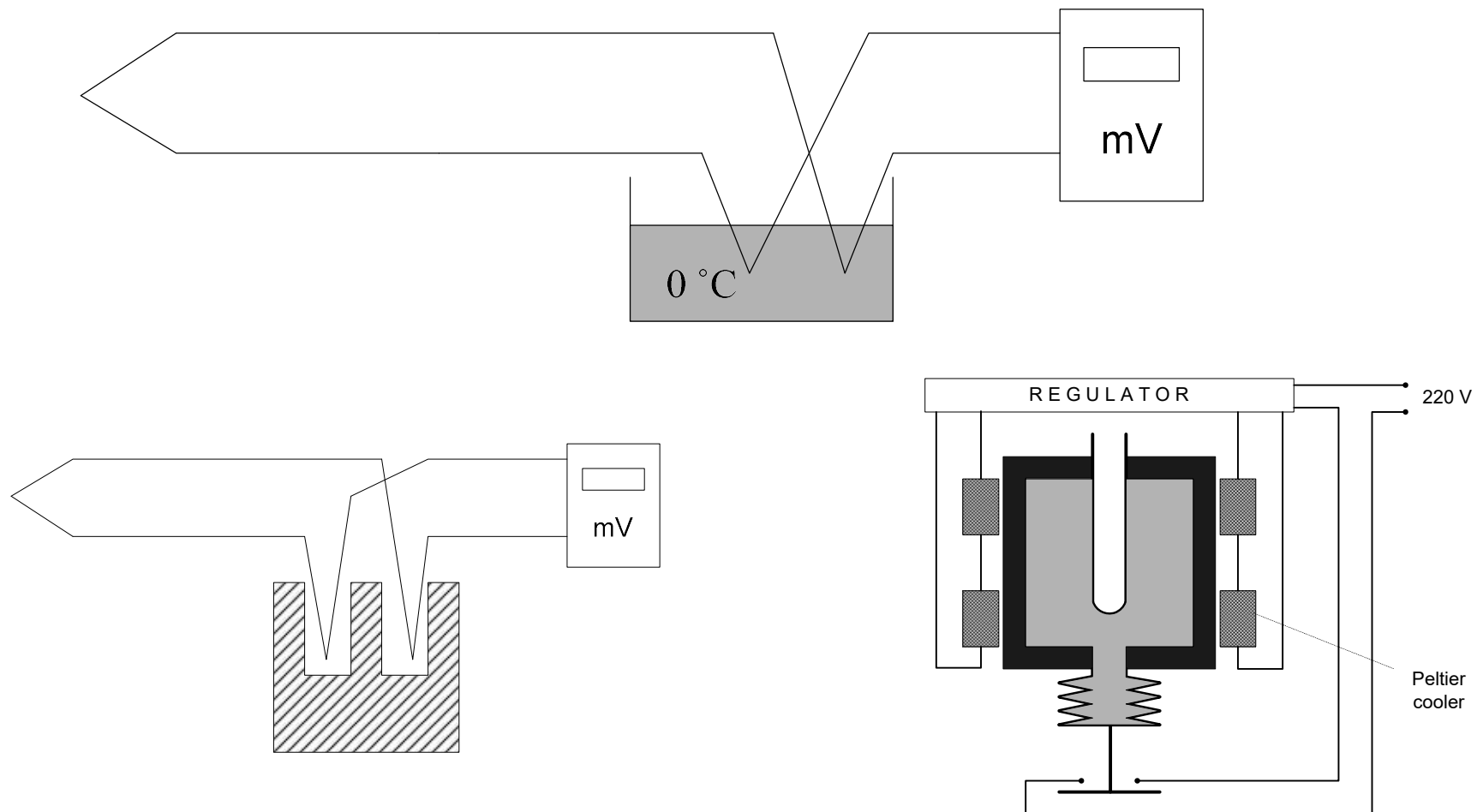
$$\Rightarrow e_{BC}(t_0') + e_{CA}(t_0') = -e_{AB}(t_0')$$

$$E = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0') + e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0)$$

$$E = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

Termoparovi - ice point cell

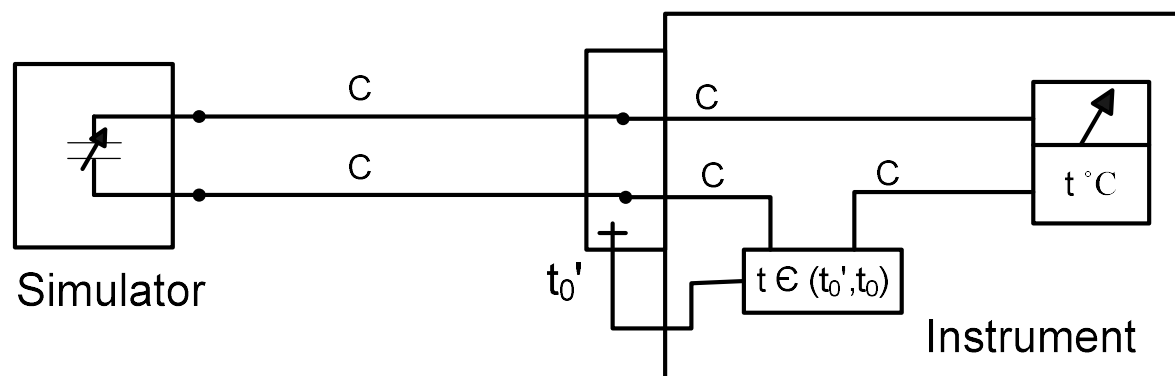
Možemo osigurati da je $t' = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
(pomoću dodatnih uređaja, npr. ice-point cell).



Termoparovi - indikatori i simulatori

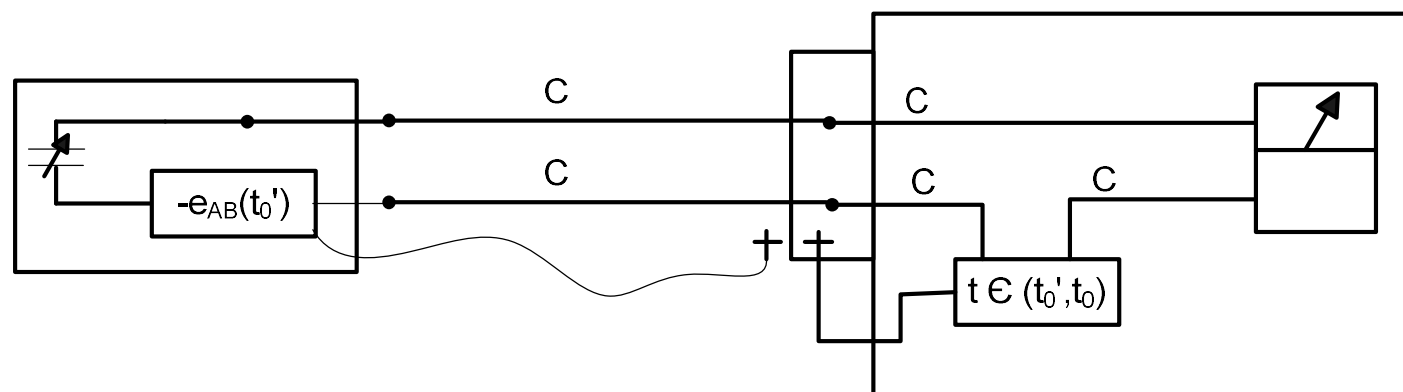
Umjeravanje milivoltmetra s automatskom kompenzacijom.

- Spajanje bakrenim vodovima



$$E = e_{AB}(t) + e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0)$$

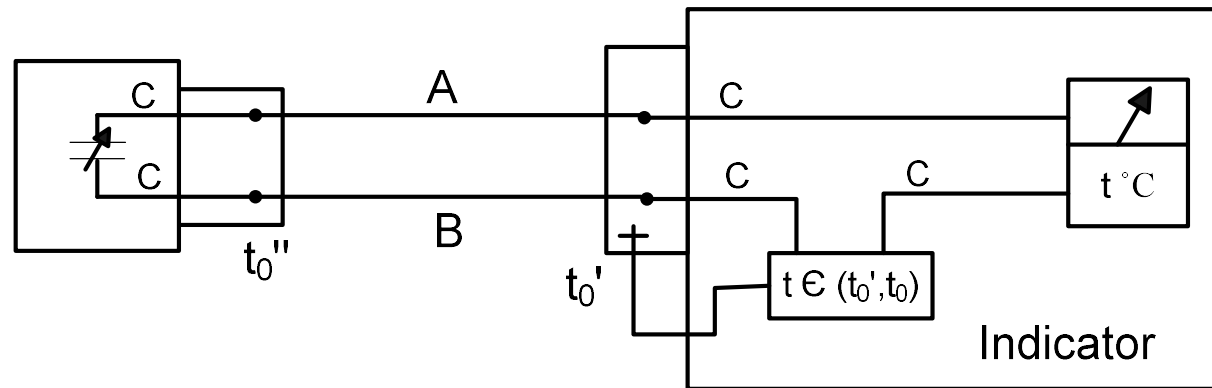
$$E = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) + e_{AB}(t_0') = E_{AB}(t, t_0) + e_{AB}(t_0')$$



Termoparovi - indikatori i simulatori

Umjeravanje milivoltmetra s automatskom kompenzacijom.

- Spajanje termoparskim žicama



$$E = e_{AB}(t) + e_{CB}(t_0'') + e_{BC}(t_0') + e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0) + e_{CA}(t_0') + e_{AC}(t_0'');$$

$$e_{BC}(t_0') + e_{CA}(t_0') = -e_{AB}(t_0')$$

$$e_{AC}(t_0'') + e_{CB}(t_0'') + e_{BA}(t_0'') = 0$$

$$-e_{BA}(t_0'') = e_{AC}(t_0'') + e_{CB}(t_0'')$$

$$e_{AB}(t_0'') = -e_{BA}(t_0'')$$

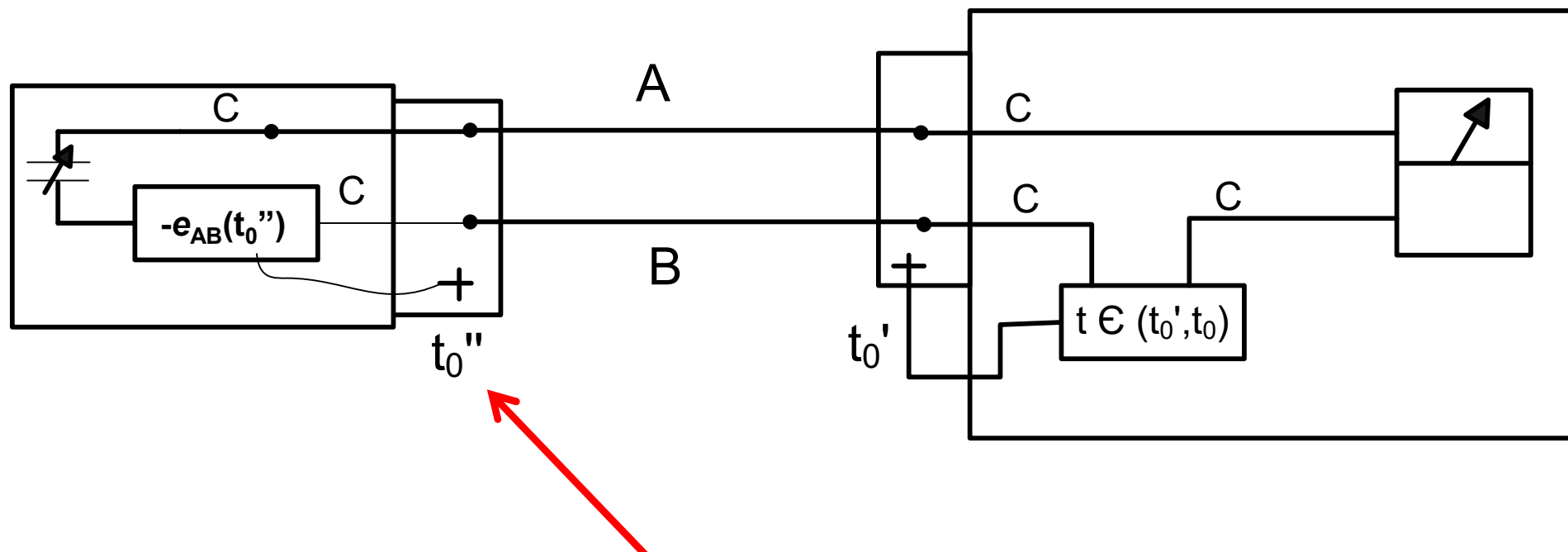
$$E = e_{AB}(t) + e_{AB}(t_0'') - e_{AB}(t_0') + e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0)$$

$$E = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) + e_{AB}(t_0'') = E_{AB}(t, t_0) + e_{AB}(t_0'')$$

Termoparovi - indikatori i simulatori

Umjeravanje milivoltmetra s automatskom kompenzacijom.

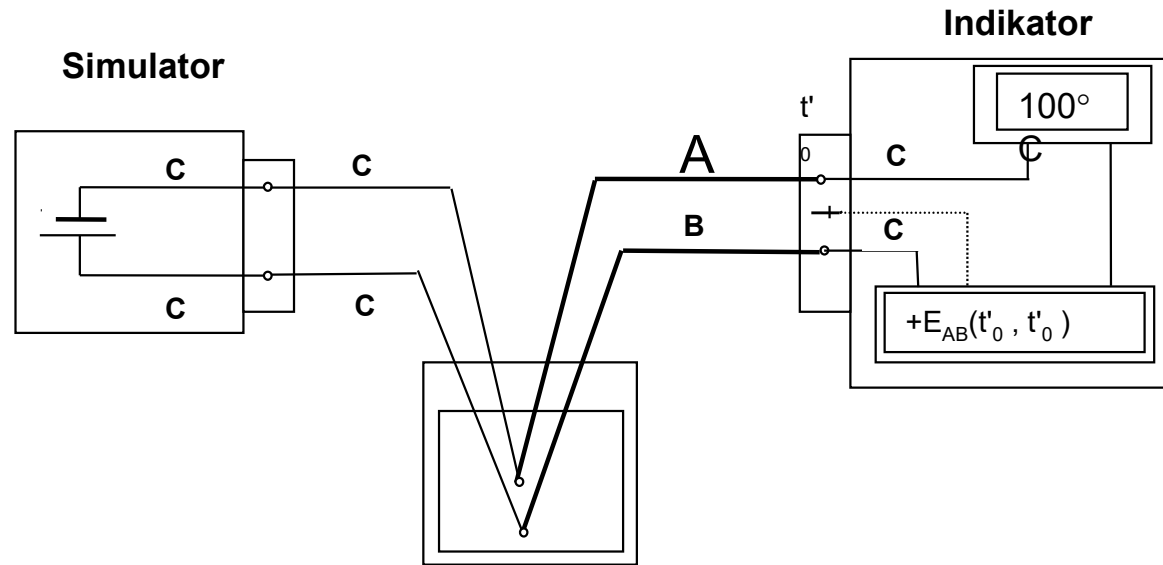
- Spajanje termoparskim žicama



Termoparovi - indikatori i simulatori

Umjeravanje milivoltmetra s automatskom kompenzacijom.

- Simulacija pomoću ledene kupke, spajanje termoparskim žicama



$$E = e_{AB}(t = 100^{\circ}\text{C}) + e_{CB}(0^{\circ}\text{C}) + e_{BC}(t'_0) + e_{AB}(t'_0) - e_{AB}(t_0 = 0^{\circ}\text{C}) + e_{CA}(t'_0) + e_{AC}(0^{\circ}\text{C})$$

$$e_{BC}(t'_0) + e_{AB}(t'_0) + e_{CA}(t'_0) = 0 \Rightarrow$$

$$E = e_{AB}(t = 100^{\circ}\text{C}) + e_{CB}(0^{\circ}\text{C}) - e_{AB}(t_0 = 0^{\circ}\text{C}) + e_{AC}(0^{\circ}\text{C})$$

$$-e_{AB}(t_0 = 0^{\circ}\text{C}) = e_{BA}(t_0 = 0^{\circ}\text{C}) \Rightarrow$$

$$e_{CB}(0^{\circ}\text{C}) + e_{BA}(t_0 = 0^{\circ}\text{C}) + e_{AC}(0^{\circ}\text{C}) = 0 \Rightarrow$$

$$E = e_{AB}(t = 100^{\circ}\text{C})$$

Termoparovi - mjerna nesigurnost

THERMOCOUPLE UNDER CALIBRATION UNCERTAINTY BUDGET										
$V_X(t) = V_{iX} + \delta V_{iX1} + \delta V_{iX2} + \delta V_{iX3} + \delta V_{HX} + \delta V_{LX} - \frac{\delta t_{X0}}{C_{X0}} + \delta V_{INT} + \frac{\Delta t}{C_X}$										
Voltmeter - transfer thermocouple (DMM-DUT)										
Measured value	V_{iX}	9570.15	μV	0.027	μV	normal (1σ)	1	[-]	0.027	μV
DMM-DUT calibration	δV_{iX1}	0.00	μV	0.902	μV	normal (2σ)	1	[-]	0.451	μV
DMM-DUT resolution	δV_{iX2}	0.00	μV	0.005	μV	rectangular	1	[-]	0.001	μV
DMM-DUT drift	δV_{iX3}	0.00	μV	0.700	μV	rectangular	1	[-]	0.404	μV
Transfer thermocouple (DUT)										
DUT Inhomogeneity	δV_{HX}	0.00	μV	19.33	μV	rectangular	1	[-]	5.580	μV
Other influences										
Influence factors	δV_{LX}	0.00	μV	1.507	μV	rectangular	1	[-]	0.870	μV
Ice point - DUT	δt_{X0}	0.022	$^{\circ}\text{C}$	0.015	$^{\circ}\text{C}$	normal (1σ)	0.187395	$^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$	0.080	μV
Interpolation eq.	δV_{INT}	0.00	μV	0.82	μV	normal (1σ)	1	[-]	0.820	μV
DUT emf	V_X	9570.03	μV	Standard uncertainty				$u_{VX} =$	7.494	μV
								$u_{tX} =$	0.652	$^{\circ}\text{C}$
DUT temperature	t_X	998.472	$^{\circ}\text{C}$	Expanded uncertainty ($k=2, 95\%$)				$U_{VX} =$	14.989	μV
								$U_{tX} =$	1.304	$^{\circ}\text{C}$

**Proširena nesigurnost, $U (k=2) = 1.304 \text{ }^{\circ}\text{C}$
(nivo pouzdanosti $\approx 95\%$)**

Termoparovi - mjerna nesigurnost

- **standardna devijacija za 10 očitavanja etalona (tip A, normalna razdioba):**

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

u - standardna nesigurnost

s - standardna devijacija

n - broj očitavanja (najmanje 10)

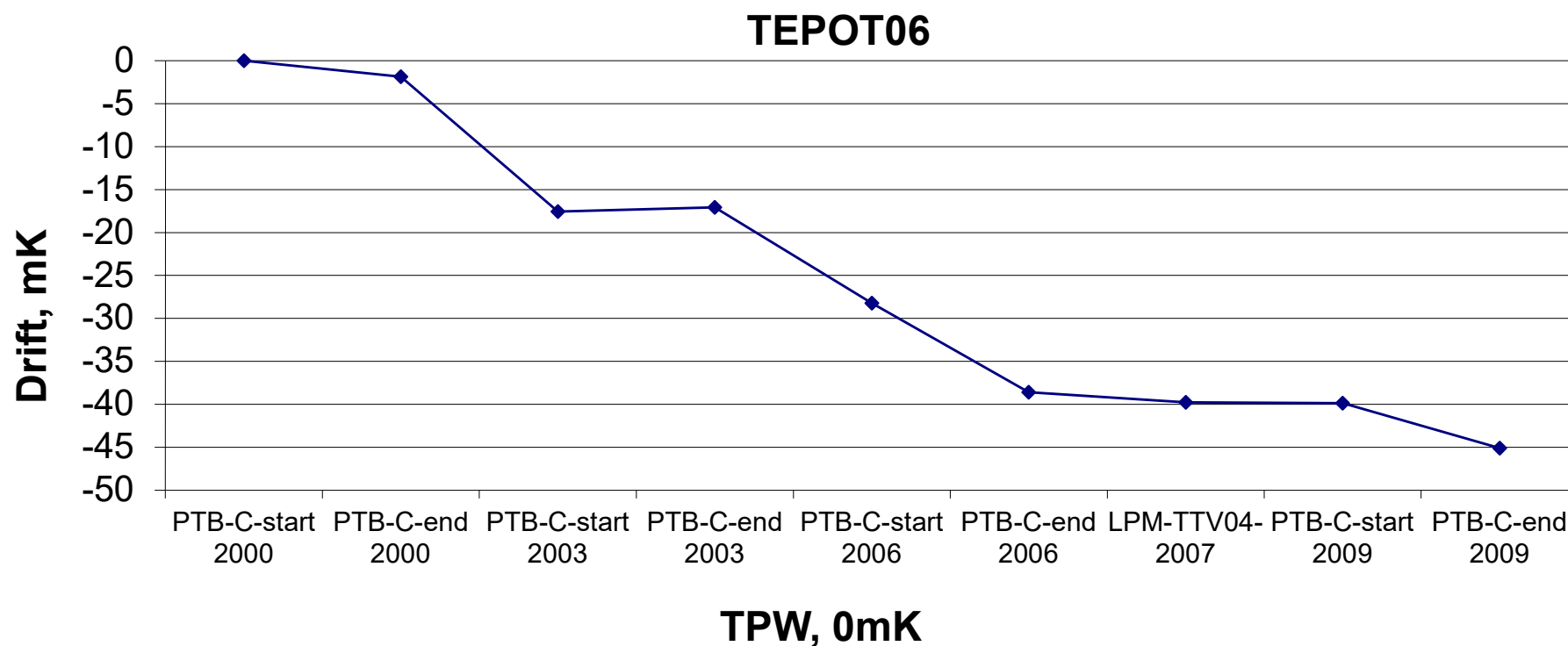
x_i - *i*-to očitavanje

x - srednja vrijednost *n* očitavanja

- **Nesigurnost umjeravanja termopara (iz potvrde o umjeravanu, normalna razdioba, k=2)
Uključuje i nehomogenost termopara**
-

Termoparovi - mjerna nesigurnost

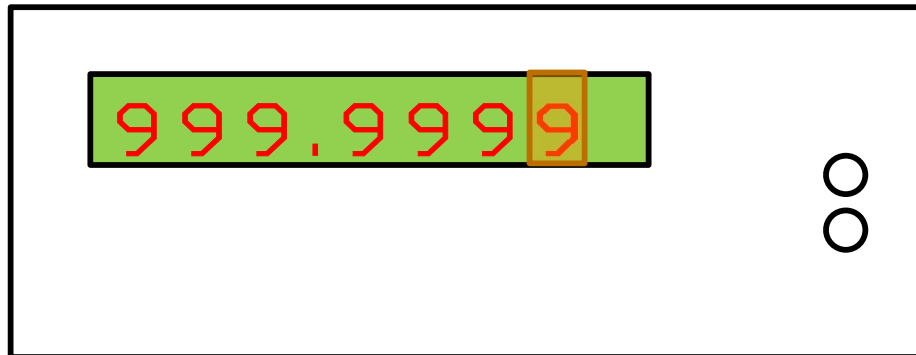
- drift termopara



Termoparovi - mjerna nesigurnost

MULTIMETAR

- nesigurnost mjerenja termonapona (podaci iz potvrde o umjeravanju multimetra, normalna razdioba, $k=2$)
- drift multimetra
- rezolucija multimetra



$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.0000001}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

- parazitni naponi i ostali utjecaji (npr. skener)

Hvala na pažnji!
