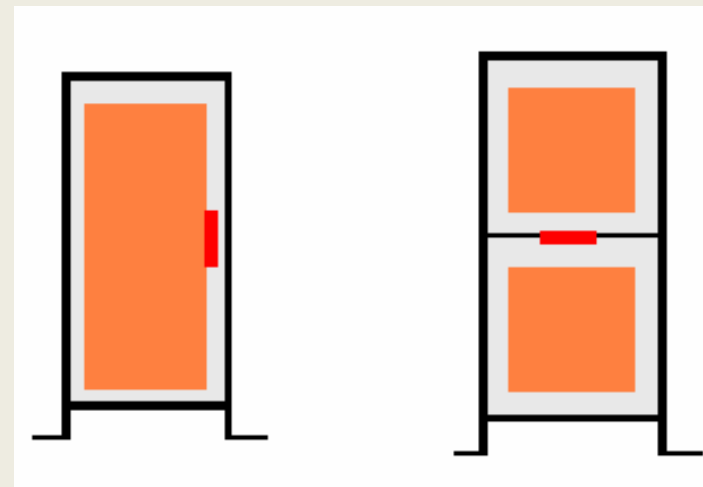
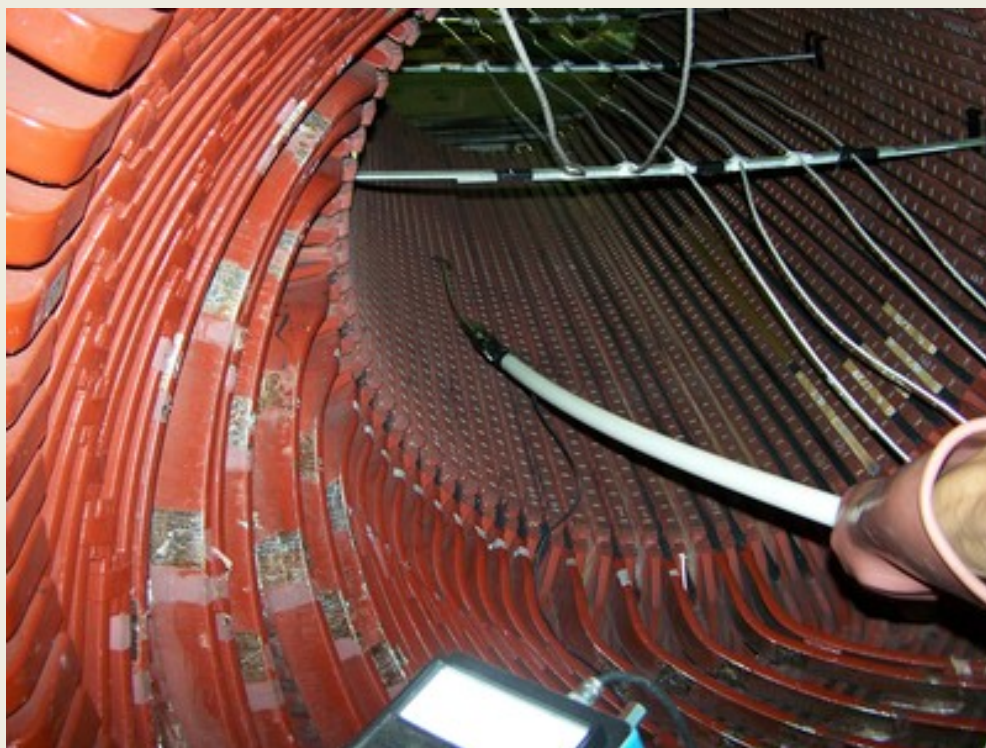




Visoka škola elektrotehike i računarstva
strukovnih studija 2015/2016
Specijalističke studije SNET

Monitoring i
Dijagnostika
Električnih
Mašina

MERENJE TEMPERATURE ELEKTRIČNIH MAŠINA I TRANSFORMATORA



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

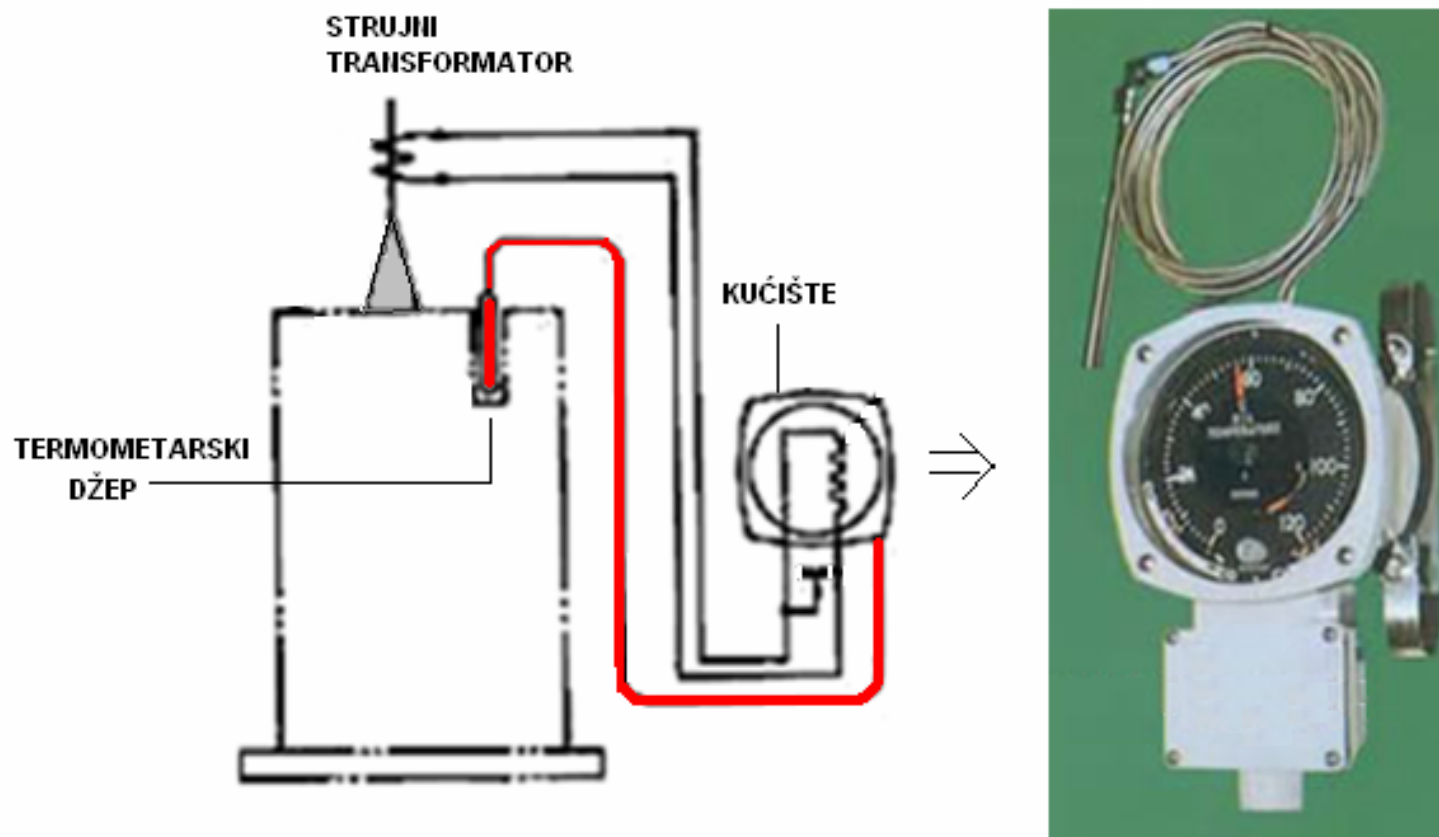
UVOD

- Merenje temperatura električnih mašina i transformatora predstavlja jednu od veoma bitnih procedura kako u njihovoj dijagnostici i ispitivanju, tako i u monitoringu.
- Ova grupa merenja spada u veoma zahtevna merenja u pogledu pristupačnosti, verodostojnosti i tačnosti.
- Obično se ova merenja izvode u toku rada ili prilikom ogleda njihovog zagrevanja, ali se mogu izvoditi i nakon isključenja mašine.
- Pošto su električne mašine i transformatori nehomogeni po svom sastavu (bakar, gvožđe, vazduh, izolacija, uljni medijum i sl.) potrebno je vršiti merenja na različitim mestima:
 - u bakarnim namotajima
 - u magnetnom kolu (gvožđu)
 - na površini izolacije
 - u ulju
- Postoje uglavnom tri načina merenja temperatura: (1) pomoću termometara (sa živom Hg ili alkoholom C₂H₅OH), (2) posredstvom promene otpornosti namotaja i (3) posredstvom ugrađenih termičkih senzora (detektora) kao što su na primer, otporni senzori Pt100, Pt1000 ili termospregovi (termoparovi) (4) posredstvom IC zračenja (pirometri) i termovizijskih metoda (termovizijska kamera)

PRIMENA TERMOMETARA

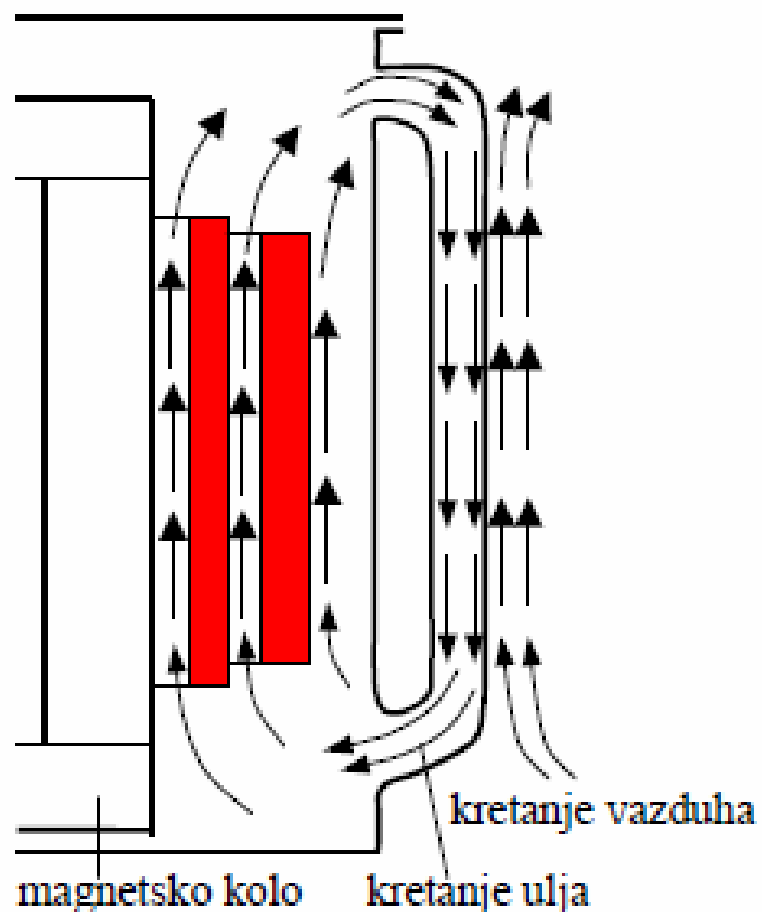
- Ovo je najstariji i najneposredniji način merenja, a obavlja se prislanjanjem termometra na pristupačnu površinu čija se temperatura meri ili postavljanjem termometra u okolnom prostoru (tada se meri temperatura ambijenta)
- Ovi termometri su obično sa živom (Hg) ili sa alkoholom-etanolom (C_2H_5OH)
- Ovom metodom se meri temperatura okoline (ambijenta) - ϑ_a ili temperatura ulja u transformatorskom sudu – ϑ_u .
- Takođe, ovom metodom se mogu meriti temperatura magnetnog kola (gvožđa), ležajeva, eventualno namota (ako je pristupačan), komutatora kod DC mašina (po zaustavljanju), kliznih prstenova i kontakata (pobuda sinhronih mašina i namotanih rotora asinhronih mašina) i sl.
- Postavljanjem termometra na toplu površinu se ne sme remetiti ventilacija objekta na kojem se meri temperatura.
- Termički kontakt mora biti pouzdan i kvalitetan (napr. tampon od filca).
- Problem pri merenju: padovi temperature kroz materijale koji se nalaze između rezervoara (kapilare) termometra i površine čija se temperatura meri (izolacija namota, filc i sl.).
- Jedino se zadovoljavajuća tačnost može dobiti kod merenja temperature okoline ili temperatura ulja (termometar direktno postavljen u medijum).

PRIMER: MERENJE TEMPERATURE U TRANSFORMATORSKOM SUDU

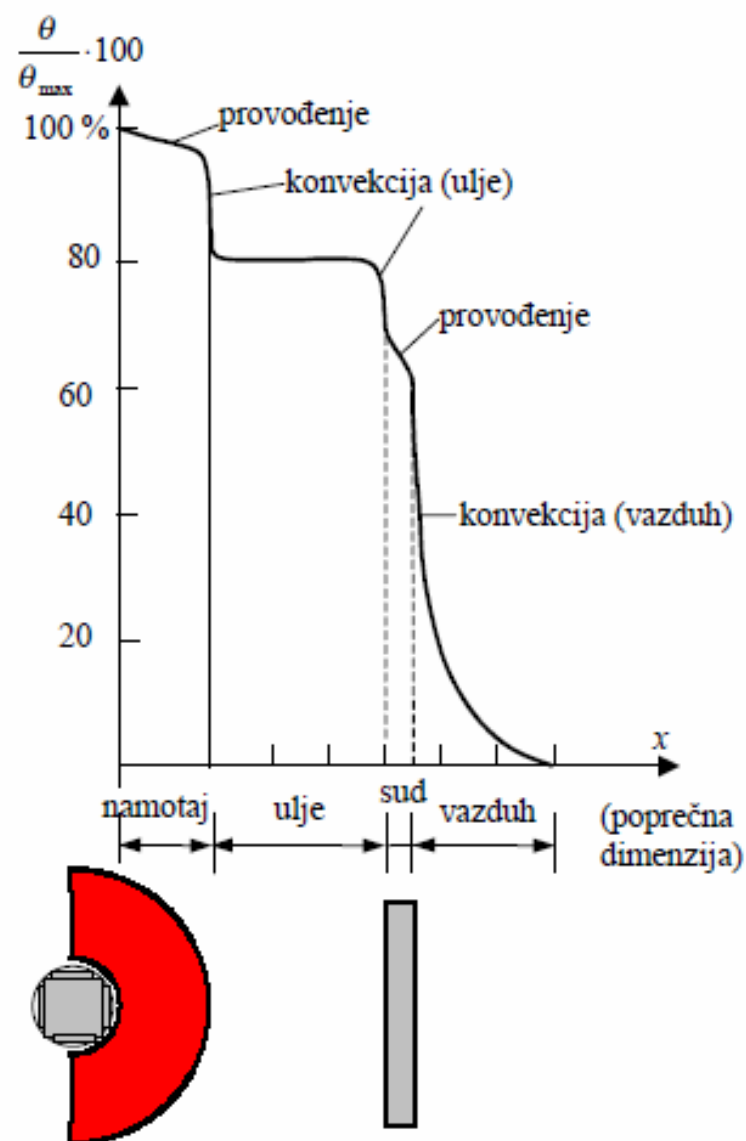


Termometar se postavlja u procep na vrhu transformatorskog suda u tzv. **termometarski džep**. Obično se vrši merenje temperature najtoplije tačke u ulju. Na vrhu se postavlja termometar jer je tu najtoplije ulje. Najhladnije ulje je na dnu transformatorskog suda. Ovakva raspodela temperatura je posledica složenih termičkih procesa koji se imaju u transformatorskom sudu.

RASPODELA TEMPERATURA U TRANSFORMATORSKOM SUDU



**CIRKULACIJA RASHLADNOG ULJA U
TRANSFORMATORSKOM SUDU I
CIRULACIJA SPOLJAŠNJEG VAZDUHA**

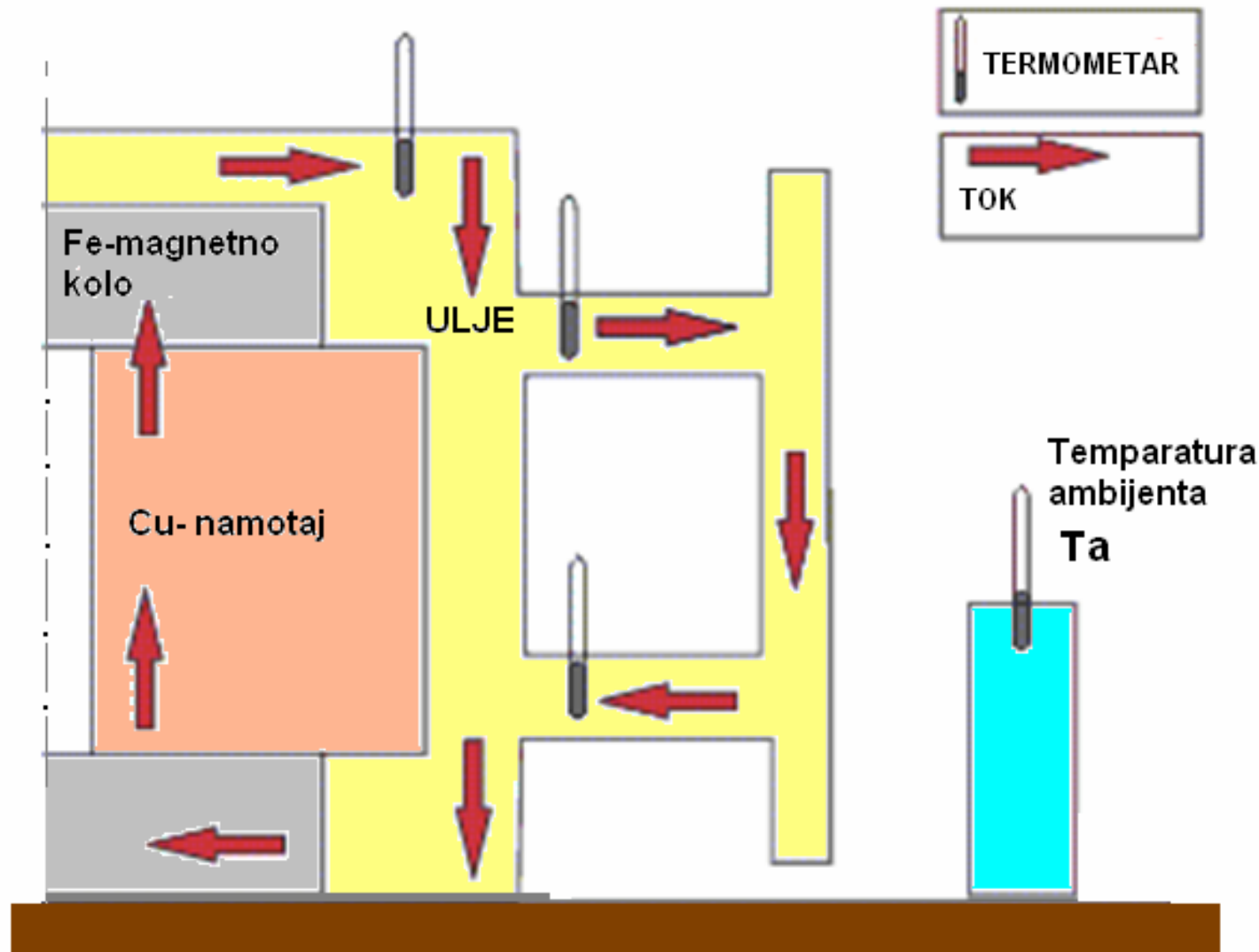


**RASPODELA TEMPERATURA U HORIZANTALNOM
PRESEKU TRANSFORMATORSKOG SUDA**

PRIMER: IZGLED TERMOMETRA I MERNE TAČKE



Industrijski
termometar



Temperatura gvožđa (Fe) se posredstvom termometara može meriti pogodno kod suvih transformatora (nemaju ulje kao rashladni medijum).

MERENJE TEMPERATURE PROMENOM OTPORNOSTI

- Metoda merenja temperature zagrejanog namotaja ϑ_2 [°C] se može odrediti ako su na raspolaganju (ili su poznati): temperatura hladnog namotaja ϑ_1 (obično se usvaja 20°C), otpornost na toj temperaturi R_1 [Ω] i otpornost na temperaturi zagrejanog namotaja R_2 [Ω] :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1} \quad (\text{RELACIJA VAŽI ZA BAKAR})$$

$$\vartheta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \vartheta_1) - 235$$

- Greška pri određivanju ϑ_2 , pod pretpostavkom da je ϑ_1 poznato iznosi:

$$\Delta \vartheta_2 = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) (235 + \vartheta_1)$$

$\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_a$ ne sme da bude veće od unapred zadate vrednosti za datu klasu izolacije

Tako na primer kod transformatora $\Delta \vartheta \leq 60^\circ\text{C}$ za klasu izolacije A. Treba napomenuti da $\Delta \vartheta$ ne zavisi od ϑ_2 već od gubitaka P_γ mašine ili transformatora.

PRIMER:

$\vartheta_2 = 115^\circ\text{C}$ (klasa izolacije F ili H) i $\Delta R_1/R_1 = \Delta R_2/R_2 = 1/100 = 0.01$ (1%);

$R_1 = U_1/I_1$ (hladan namotaj), $R_2 = U_2/I_2$ (zagrejan namotaj), klasa tačnosti instrumenta $k=0.5$.

Za ove realne podatke i iz relacije za grešku, se dobija da je greška određivanja temperature ϑ_2 jednaka $\Delta \vartheta_2 = 7^\circ\text{C}$, odnosno 6.1%. Ovo je relativno velika greška.

ZAKLJUČAK: Potrebno je stoga što preciznije meriti otpore R_1 i R_2 .

U praksi se preporučuje merenje otpora istom metodom i šemama povezivanja, istim instrumentima, približno istom strujom i na istom opsegu instrumenta.

NA REZULTAT MERENJA UTIČE I GREŠKA PRI ODREĐIVANJU TEMPERATURE HLADNOG NAMOTA ϑ_1

Ako se pretpostavi da su R_1 i R_2 tačno izmereni i da je temperatura ϑ_1 izmerena sa greškom $\Delta \vartheta_1$, tada je greška pri merenju ϑ_2 :

$$\Delta \vartheta_2 = \frac{R_2}{R_1} \Delta \vartheta_1$$

Uvek je $R_2 > R_1$, te je greška određivanja ϑ_2 uvek veća od greške određivanja ϑ_1 , ali je istog reda veličine!!

Realni odnos (u praksi) $R_2/R_1 \approx 1.4$

- Osnovna specifičnost ove metode je što ona daje srednju vrednost temperature namotaja, koju inače i standardi i propisi definišu.
- Merenje otpora u toku rada moguće je kod svih namota napajanih jednosmernom strujom (statorskih i rotorskih)
- Kod rotorskih namotaja (induktori sinhronih mašina) priključenje voltmetara u toku merenja se vrši preko metalnih četkica koje su pričvršćene na izolovane držače za kontaktne prstenove
- Merenje otpora statora mašina za naizmeničnu struju može da se izvrši jedino na kraju ispitivanja pri isključenoj i zaustavljenoj mašini (**isključenje mašine ne znači i njeno zaustavljanje!! Zašto?**)
- Zbog vremena koje je proteklo od isključenja mašine do njenog zaustavljanja, temperatura namota može da se promeni i da stoga dobijemo netačan rezultat
- Ako je taj period duži od 20s vrši se **ekstrapolacija** krive hlađenja i na osnovu nje se odredi temperatura u trenutku isključenja
- Otpor namotaja se pri tome meri najmanje tri puta, u približno istim intervalima vremena ne dužim od trajanja prvog merenja (obično ne dužim od 2 min)

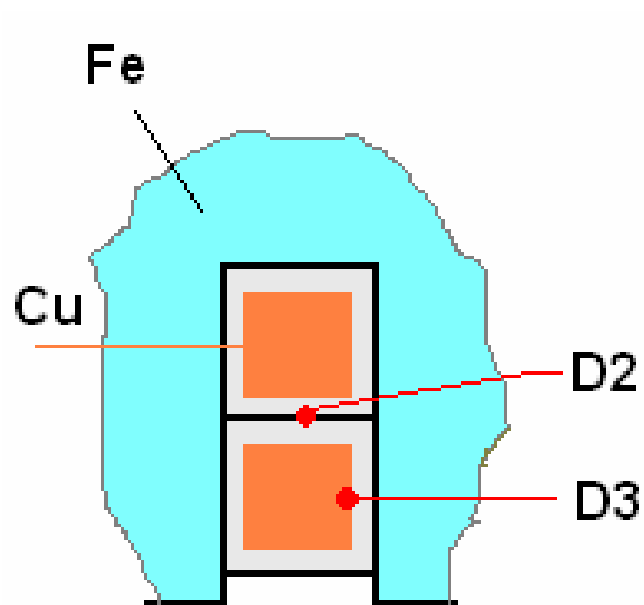
MERENJE TEMPERATURE POMOĆU UGRAĐENIH TEMPERATURNIH SENZORA

- Ovom metodom je moguće izmeriti stvarnu temperaturu u najtoplijoj tački mašine
- U toku konstrukcije ili reparacije (remonta) mašine se postavljaju temperaturni senzori na određena mesta na kojima se očekuje najveće zagrevanje
- Senzori, inače malih gabarita, koji se koriste su: termoparovi (termospregovi) i otporni termometri
- Senzori se povezuju sa transponderima i preciznim instrumentima (analognim i digitalnim) za merenje temperature
- Naročito je teško ovom metodom meriti temperature namotaja visokonaponskih mašina

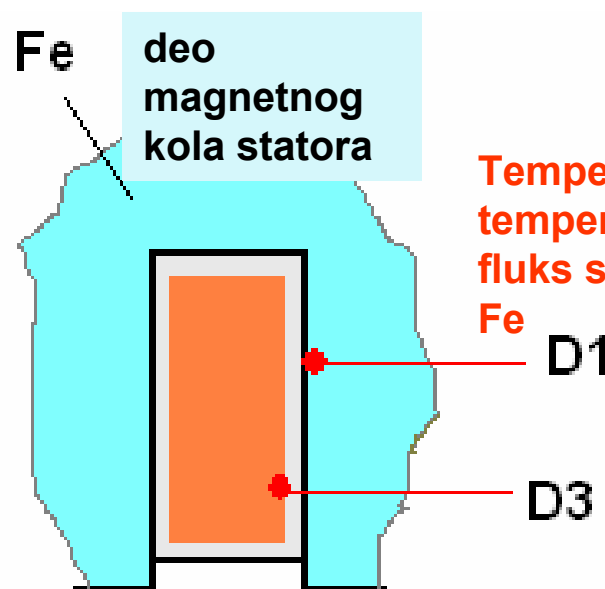
POSTAVLJANJE TEMPERATURNIH SENZORA

Kod VN sa izolacionom čaurom oko provodnika postavljanje termosenzora (detektora) se ostvaruje se obično u žlebovima u kojima se smeštaju namotaji ili na bočnim vezama. Tačnija pozicija senzora je na sledećim mestima:

- Položaj D1 (u žlebu na površini izolacionog sloja provodnika – između izolacije i Fe)
- Položaj D2 (između slojeva provodnika u žlebu, na sredini žleba)
- Položaj D3 (unutar izolacionog sloja prema bakarnom provodniku)

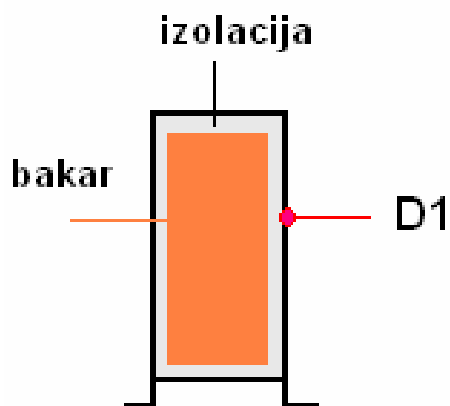


dva provodnika po žlebu

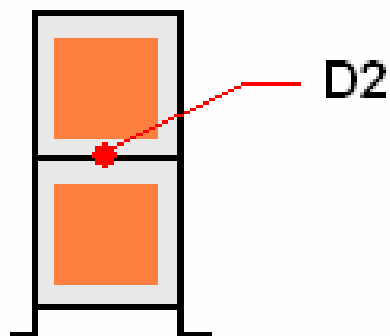


jedan provodnik po žlebu

Temperatura Cu je veća od temperature Fe, tako da termički fluks struji od Cu, preko izolacije do Fe

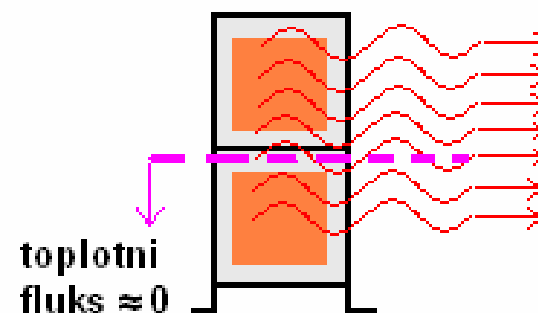
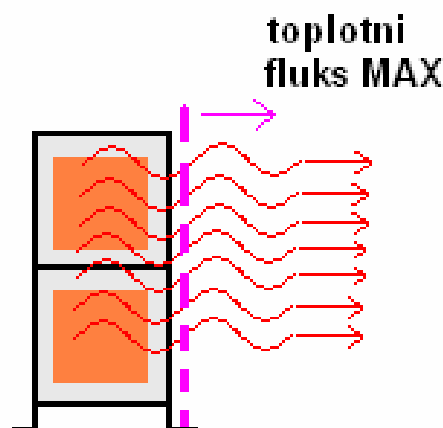


- **U položaju D1** temperaturni senzor ne pokazuje direktno temperaturu bakra (Cu) odnosno namotaja
- Da bi se dobila temperatura bakra potrebno je tačno proceniti pad temperature kroz izolaciju (10-20°C)
- Ovaj pad temperature je srazmeran debljini izolacije i gubicima u bakru provodnika, a obrnuto srazmeran termičkoj provodnosti izolacionog namotaja
- GREŠKA KOJA SE OVDE ČINI MOŽE DA IZNOSI 15-20°C
- Povoljno koristiti ovaj položaj kad se ima tanka izolacija dobre termičke provodnosti

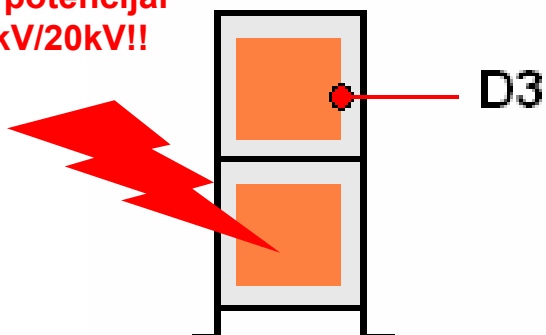


- **U položaju D2** temperaturni senzor verno meri temperaturu bakra (Cu) tj. namotaja jer nema toplotnog fluksa (jer nema pada temperature) kroz izolaciju na mestu postavljanja. **Stoga se ovaj položaj najčešće koristi!! Greška merenja ovde može biti do max 5 °C**

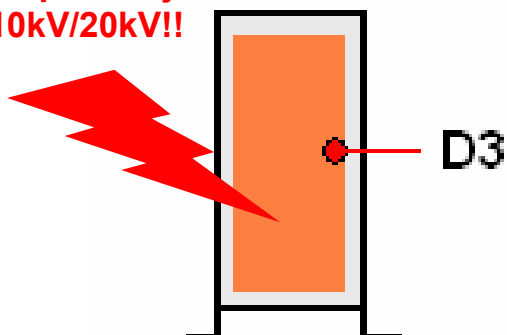
Temperatura Cu je veća od temperature Fe, tako da toplotni fluks struji od Cu , preko izolacije do Fe



Visoki potencijal
6kV/10kV/20kV!!



Visoki potencijal
6kV/10kV/20kV!!



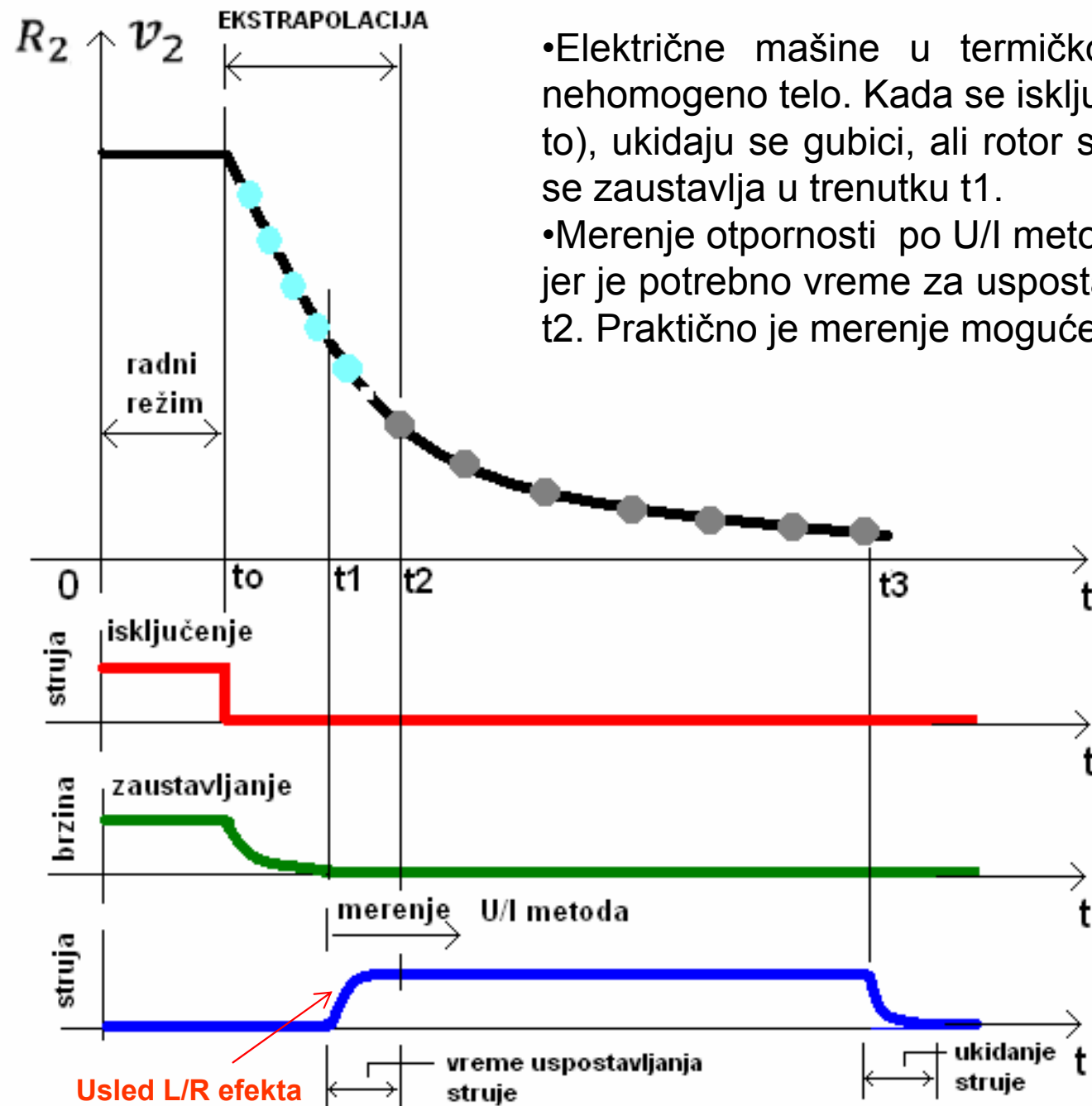
- **U položaju D3** merenje je najkorektnije (ima se veoma mala greška merenja), ali se ne može uvek izvesti zbog bezbednosti
- U ovom slučaju senzor i pripadajuće merno kolo su na potencijalu bakra namotaja kada su mašina ili transformator u radu
- Pogotovu postoji problem (praktično je merenje neizvodljivo) kada je namotaj mašine na visokom potencijalu (6kV , 10kV ili 20kV)
- Asinhroni motor-VN ide do 6kV, sinhrona mašine -VN ide do 20kV

- MERENJE POMOĆU TEMPERATURNIH SENZORA (DETEKTORA) NIJE PRAKTIČNO ZA SVE MAŠINE ZBOG SLOŽENOSTI MERNIH KOLA
- ZA MALE MAŠINE OVO NIJE BAŠ PRAKTIČNO TAKO DA SE OVI SENZORI KORISTE UGLAVNOM KOD MAŠINA VELIKIH SNAGA

MERENJE TEMPERATURE ROTORA

- Merenje temperature obrtnih delova (rotora) je nemoguće izvesti pomoću termometara, dok se ne izvrši zaustavljanje rotora
- Promenom otpora je moguće izvršiti merenje temperature obrtnih delova u radu ukoliko je struja jednosmerna; ukoliko je struja naizmenična merenje temperature promenom otpora je moguće po zaustavljanju mašine
- Isključenje mašine ne znači i njeno trenutno zaustavljanje, već je potrebno da prođe određeni vremenski interval do zaustavljanja obrtnih delova (rotora).
- Po zaustavljanju električnih gubitaka nema i nastupa relativno brzo izjednačavanje temperatura.
- Radi merenja u trenutku zaustavljanja treba izvršiti više merenja, što je moguće odmah po zaustavljanju i ekstrapolirati vremensku zavisnost otpora do početnog trenutka
- Ova metoda nije dovoljno pouzdana jer se događa da temperatura u određenom intervalu vremena počinje da raste, a potom da opada (usled termičkih prelaznih procesa izjednačavanja temperature), tako da se u ovom slučaju ekstrapolacija ne može koristiti.
- Ekstrapolacija je jedino pouzdana u slučajvima ako je kriva hlađenja opadajuća bez lokalnih ekstremuma (minimuma i maksimuma)

NAČIN EKSTRAPOLACIJE KRIVE HLAĐENJA (primer namotanog rotora asinhronne mašine)

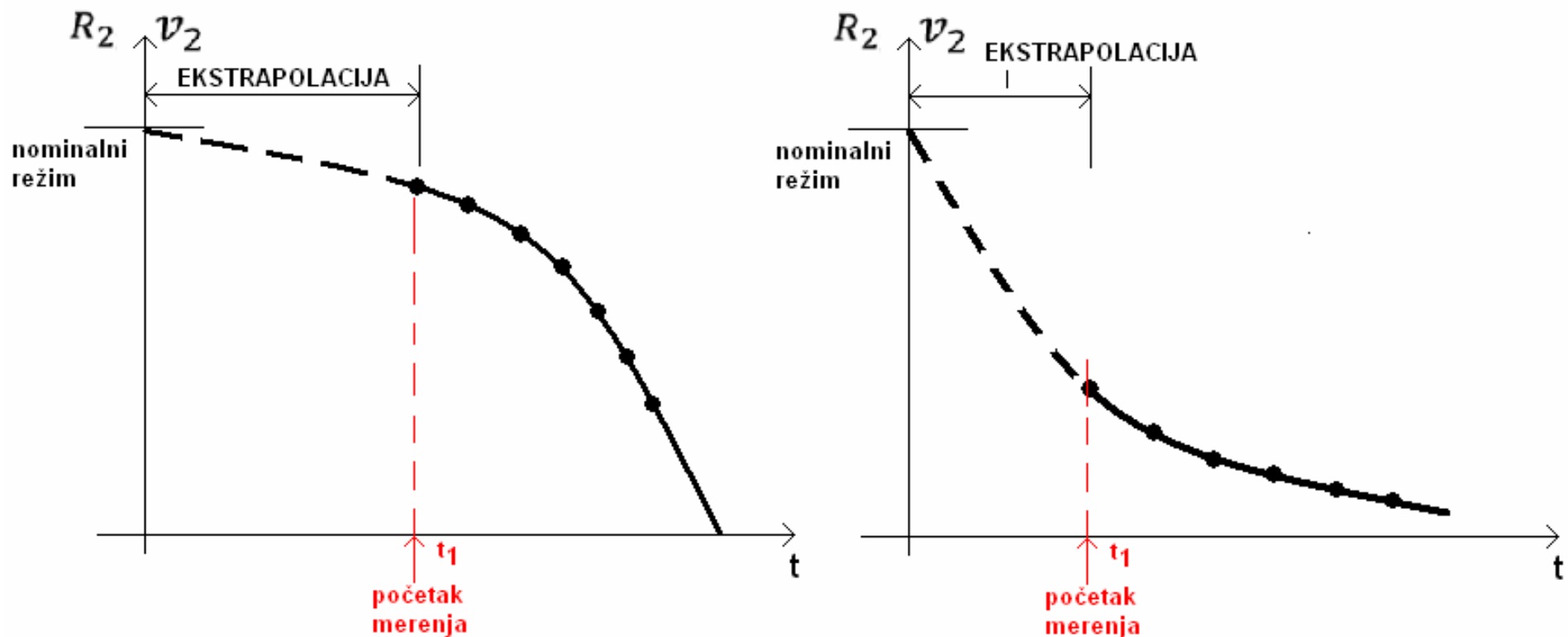


•Električne mašine u termičkom smislu predstavljaju veoma nehomogeno telo. Kada se isključe sa mrežnog napajanja (trenutak t_0), ukidaju se gubici, ali rotor se i dalje obrće usled inercije, kada se zaustavlja u trenutku t_1 .

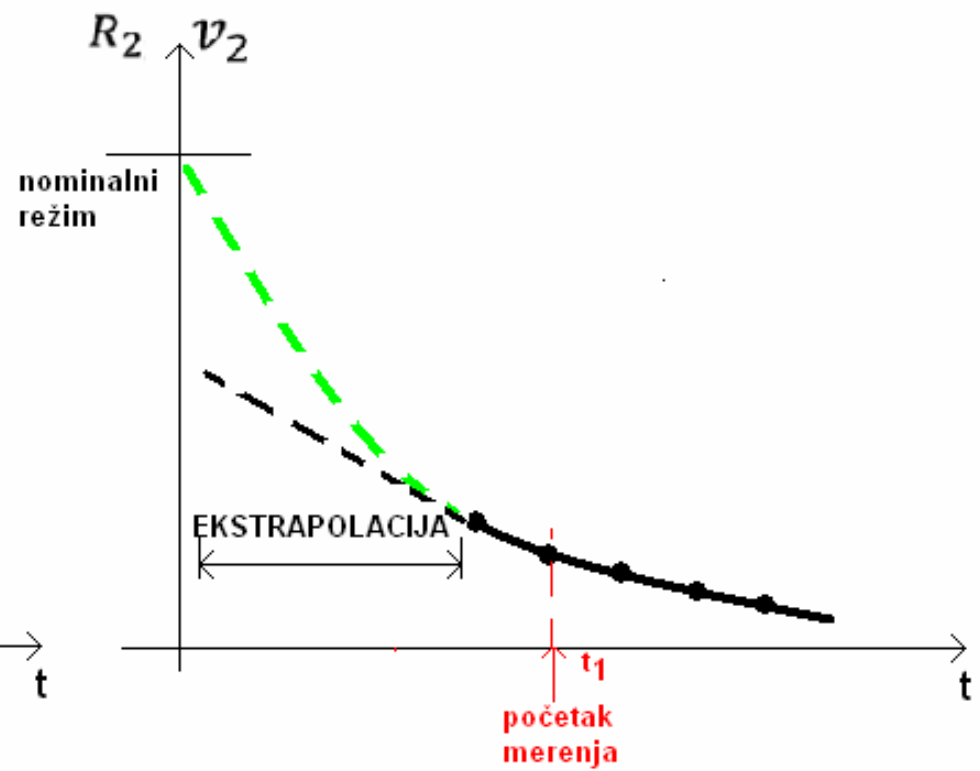
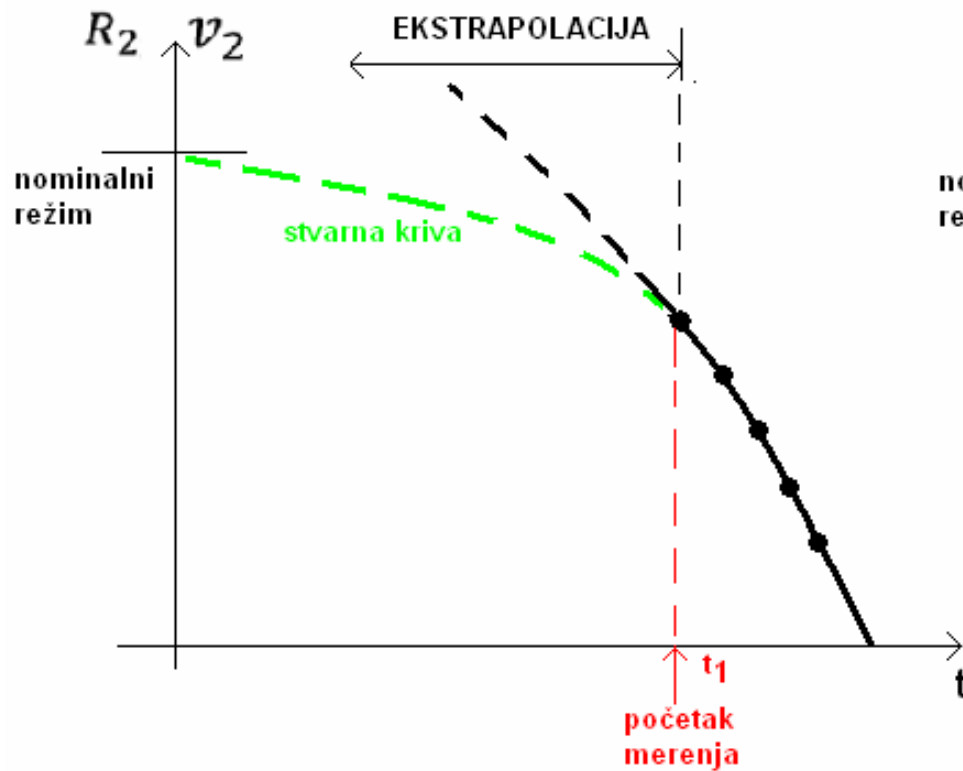
•Merenje otpornosti po U/I metodi nije moguće do trenutka t_2 jer je potrebno vreme za uspostavljanje struje merenja (do trenutka t_2). Praktično je merenje moguće izvesti tek od trenutka t_2 .

U intervalu t_0 - t_2 rotor se značajnije hladi tako da je njegovu stvarnu vrednost otpornosti R_2 ili temperature ν_2 (koje se imaju u radnom režimu) moguće dobiti ekstrapolacijom krive hlađenja dobijene merenjem (u intervalu t_2 - t_3).

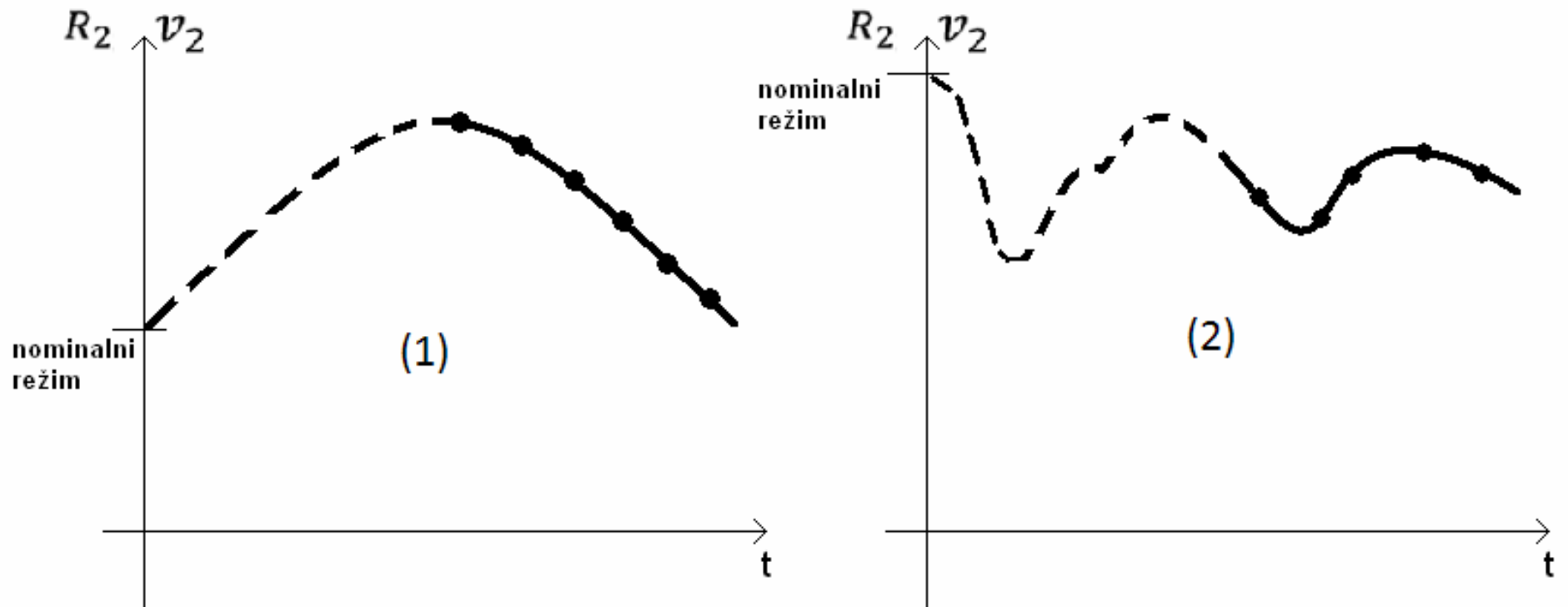
Kada nije moguće primeniti ekstrapolaciju?



- Za ova dva slučaja propisi dozvoljavaju ekstrapolaciju krive hlađenja. Ekstrapolacijom se određuje ostatak krive hlađenja sve do početnog trenutka (isprekidani deo), na osnovu čega se mogu relativno tačno očitati otpornost R_2 ili temperatura v_2 u nominalnom radnom režimu.
- Teži se da vreme početka merenja bude što kraće u odnosu na trenutak zaustavljanja mašine.

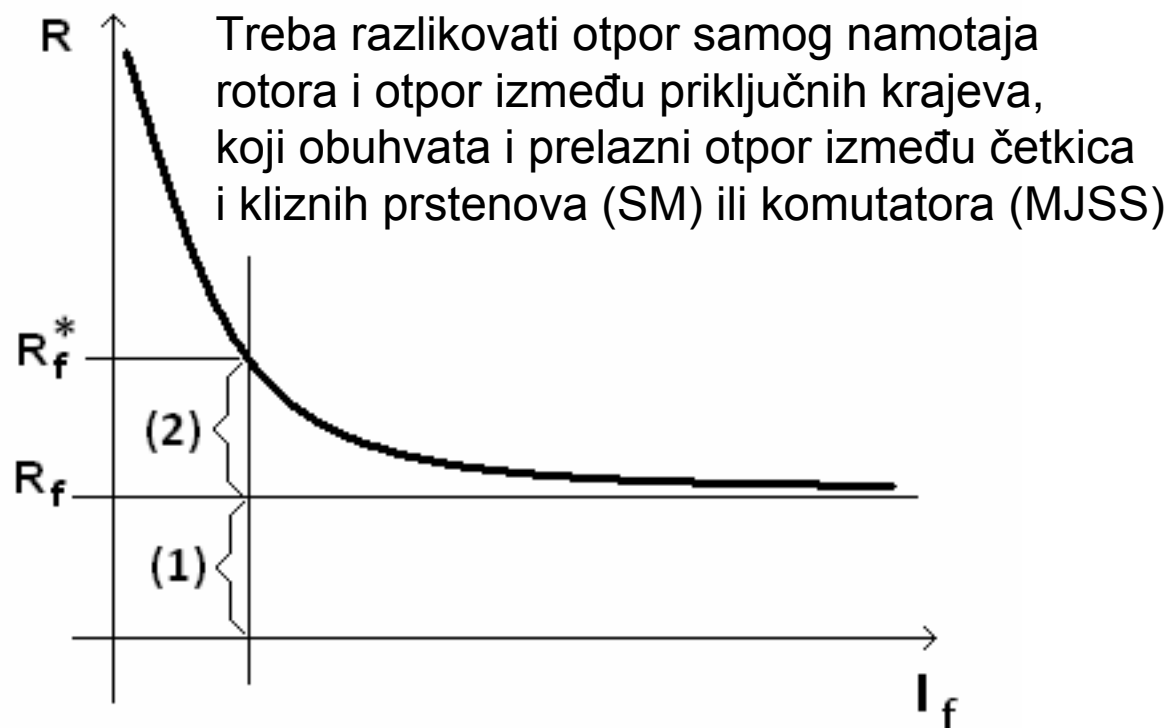
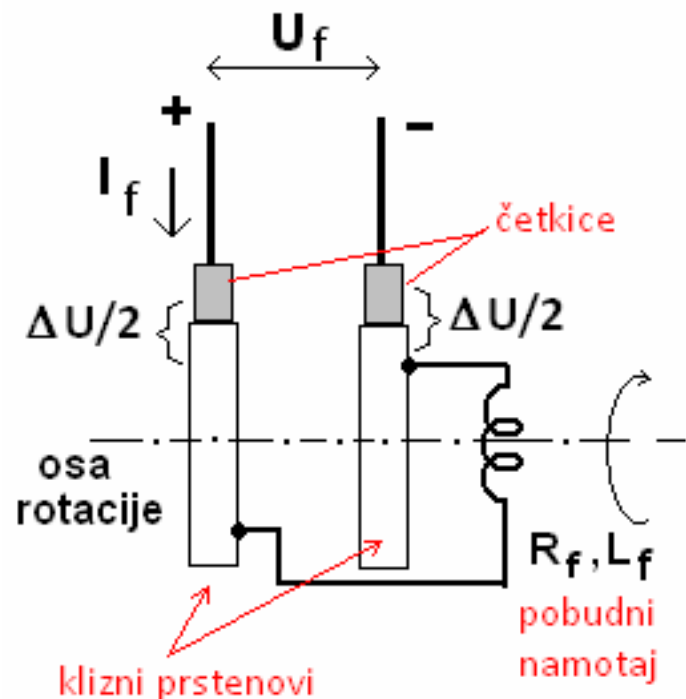


Ukoliko je vreme početka merenja dugo u odnosu na trenutak zaustavljanja ekstrapolacija nas može dovesti do značajno pogrešnih zaključaka!!!!



U ovim slučajevima propisi ne dozvoljavaju ekstrapolaciju krive hlađenja usled postojanja tačke maksimuma u intervalu vremena od interesa (kriva 1) ili usled postojanja više lokalnih ekstremuma (minimuma i maksimuma) kao što pokazuje kriva (2).

OTPORNOST ROTORA MAŠINA JEDNOSMERNE STRUJE (MJSS) i SINHRONIH MAŠINA (SM)



$$U_f = R_f I_f + \Delta U$$

$$\frac{U_f}{I_f} = R_f + \frac{\Delta U}{I_f}$$

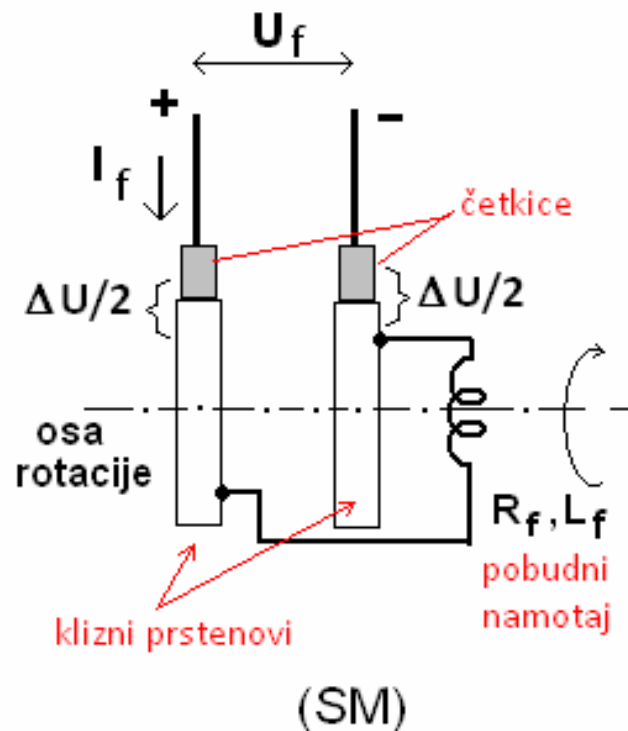
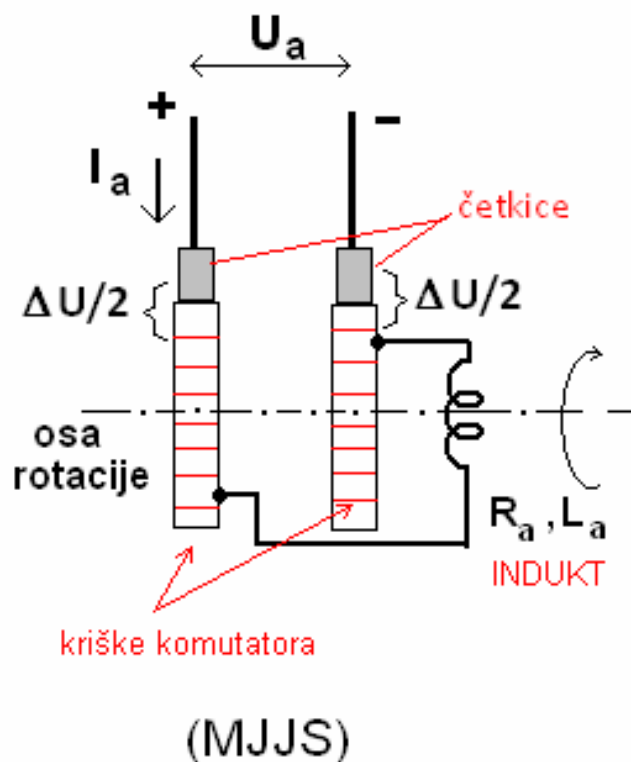
$$R_f^* = R_f + \frac{\Delta U}{I_f}$$

Ukupni otpor = galvanski otpor namotaja + prelazni otpor na četkicama

Komponenta otpornosti (1), odnosno R_f je zavisna od temperature, dok je komponenta (2), odnosno $\Delta U / I_f$ je zavisna od struje pobude

Da bi se izbegao uticaj pada napona ΔU , kod SM se postavljaju pomoćne rešetkaste četkice.

KAKO UZIMATI U OBZIR PRELAZNE OTPORE NA ČETKICAMA?



Prelazni otpor na četkicama može se uzeti u obzir preko pada napona:

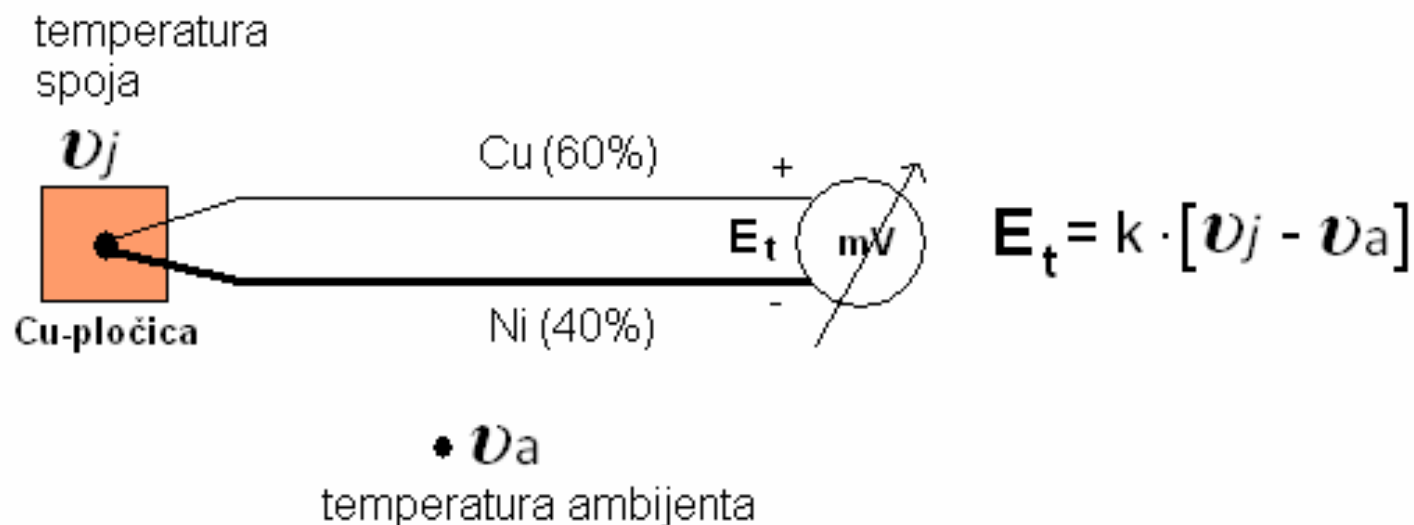
- $\Delta U \approx 2V$ za par četkica (ugljenih, grafitnih ili elektrografitnih) kod rotora MJSS,
- $\Delta U \approx 0.6V$ za par četkica (metalografritnih) kod rotora sinhronih mašina (SM)

ŠTA SVE PREDVIĐAJU PROPISI KOD MERENJA TEMPERATURA ELEKTRIČNIH MAŠINA ?

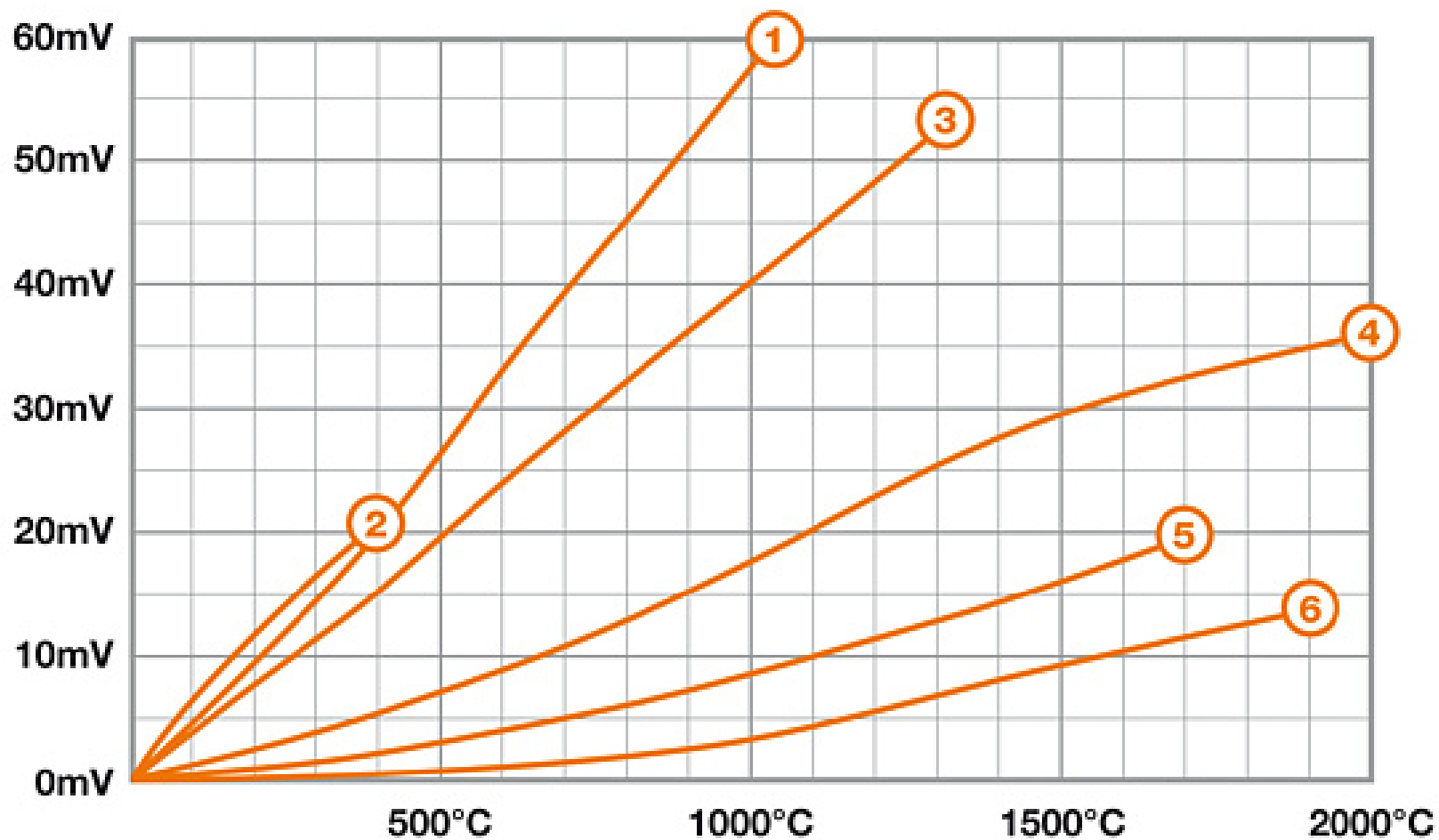
- Zbog različitih metoda i postupaka merenja temperatura dolazi do grešaka
- Da bi se korektno mogli porediti rezultati merenja između pojedinih metoda propisi o ispitivanju električnih mašina propisuju sledeće:
 - merenje srednje temperature promenom otpora
 - broj ugrađenih senzora i način njihove montaže i ugradnje
 - slučajeve primene pojedinih metoda
 - slučajeve merenja temperatura po zaustavljanju
 - uslovi hlađenja posle prekida opterećenja
 - najduže trajanje zaustavljanja
 - način ekstrapolacije krive hlađenja

TERMO-PAROVİ (TERMO-SPREGOVİ)

- Merenje temperature u ovom slučaju se zasniva na pojavi termo-elektromotorne sile (TEMS) na krajevima dva različita metala koji su na svojim drugim krajevima spojeni određenim tehnološkim postupkom (najčešće zavarivanjem).
- Zavarivanje se vrši najčešće na bakarnoj pločici radi ostvarivanja pouzdanog termičkog kontakta, pogotovu što je mesto tog spoja izloženo povišenoj temperaturi.
- TEMS koja se javlja na slobodnim krajevima je praktično proporcionalna razlici temperature spoja ν_j i temperature okoline ν_a mernog spoja koji je priključen na slobodne krajeve (tzv. Zebekov efekat).



TERMOELEKTRIČNI NAPONI ZA POJEDINE TERMO-SPREGOVE)



① Fe-CuNi

② Cu-CuNi

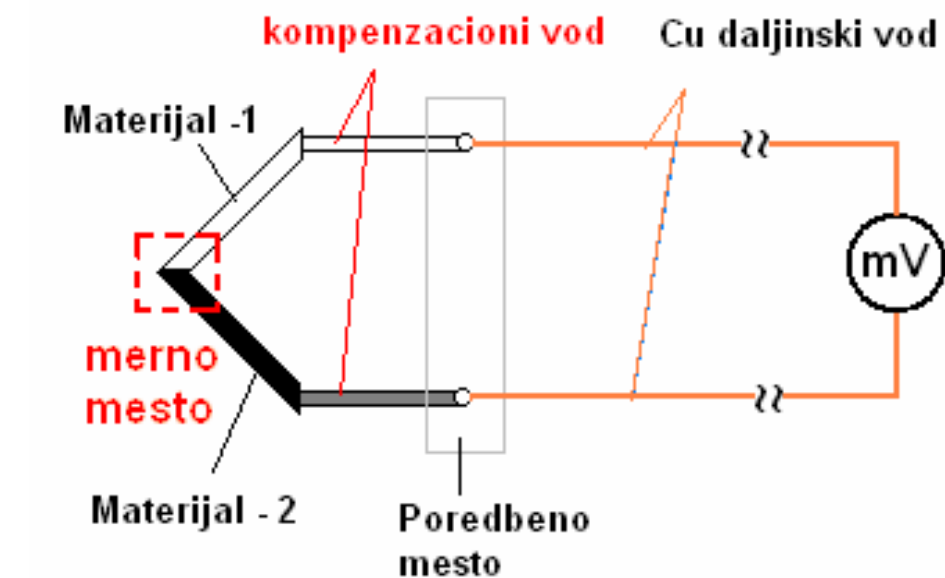
③ Ni-CrNi

④ WRe3%-WRe25%

⑤ Pt-RhPt

⑥ PtRh30%-PtRh6%

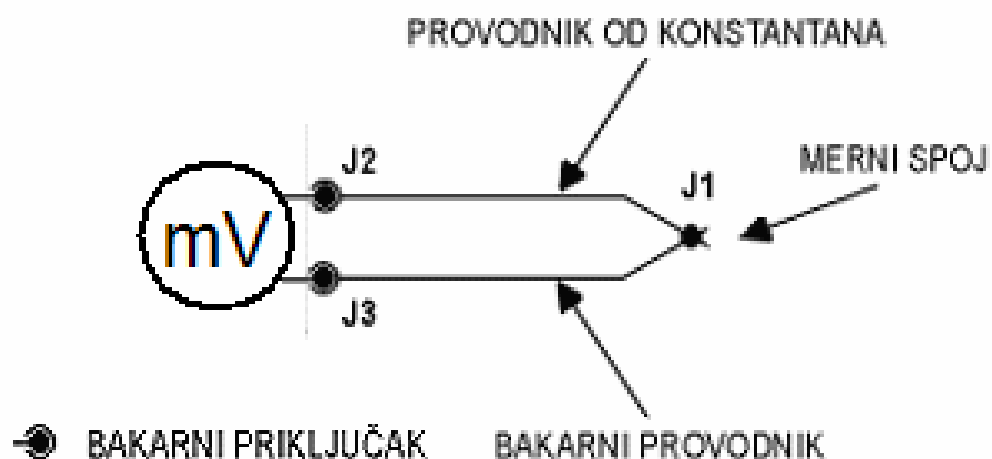
KAKO TO IZGLEDA U PRAKSI?



- Temperaturna razlika između mernog i poredbenog mesta prouzrokuje proporcionalan napon odnosno TEMS
- Kompenzacioni vodovi su od istih materijala kao termopar
- Kada se temperatura poredbenog mesta koleba potrebno je izvršiti kompenzaciju mernog spoja



PROBLEM: Cilj je izmeriti napon na spoju J, ali smo ubacivanjem milivolmetra u kolo napravili još dva spoja metal-metal: J2 i J3. Spoj J3 je Cu-Cu (pa je napon na njemu $V_3=0$), ali je napon na spoju J2 (Cu-konstantan) konačan i suprotnog smera od V_1 . Kao rezultat očitani napon na voltmetru će biti proporcionalan temperaturnoj razlici spojeva J1 i J2. To znači da temperaturu T_1 ne možemo izmeriti tačno.



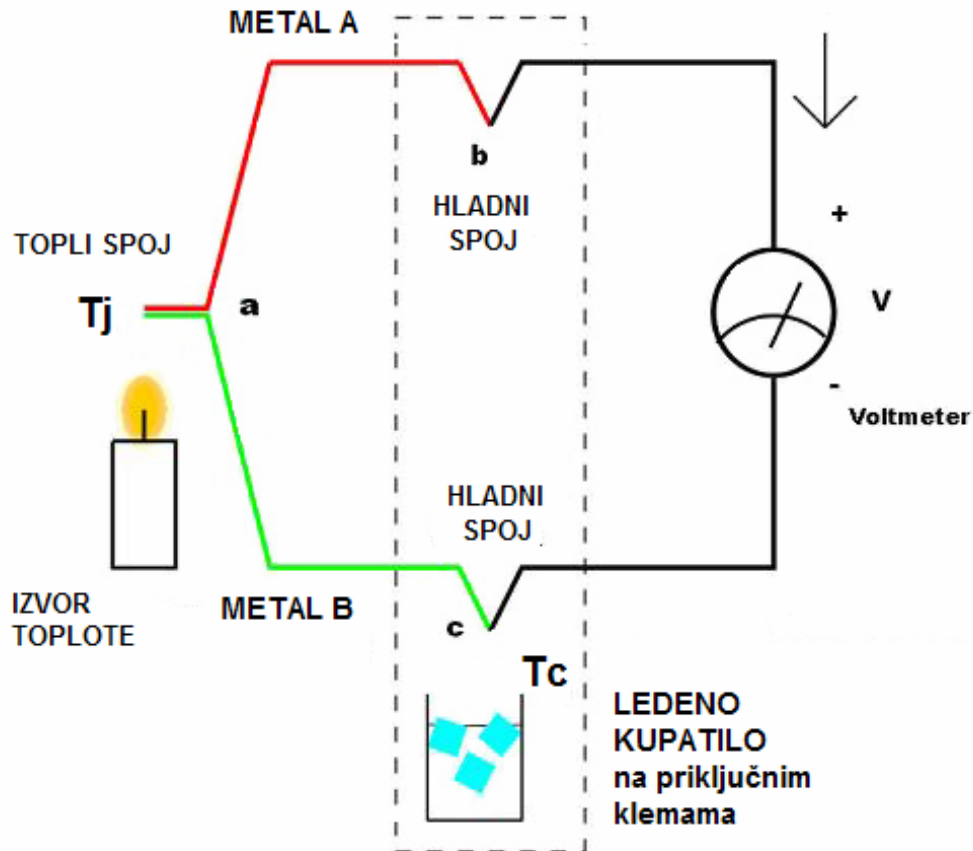
Temperaturu T_1 možemo izmeriti tačno ako poznajemo temperaturu spoja J2, odnosno T_2 . Stoga se J2 uslovno uzima kao referentni ili HLADNI spoj ($T_2=T_{ref}$), pa je pokazivanje voltmetra:

$$V_v = (V_1 - V_{ref}) = k(T_1 - T_{ref})$$

Cu žica je upotrebljena i kao jedan od metala spoja i kao provodnik za povezivanje voltmetra, pa su oba spoja, merni (J1) i referentni (J2), ustvari spoj bakar-konstantan (Cu-C).

Spoj J2 se fizički postavlja u tzv. **ledeno kupatilo**, fiksirajući referentnu temperaturu na 0°C . Onda se iz tablica za termoparove određuje temperatura. Ovo je nepraktično i može da dovede do grešaka (pogotovu što V_{ref} nije jednako 0V na 0°C !!!!)

PRIMENA “LEDENOG KUPATILA”



- Merenje temperature posredstvom termospregova (termoparova) su relativna i daju samo informaciju o razlici temperatura.
- Kada su priključni krajevi vezani za “čvrstu referencu” kao što je tzv. “ledeno kupatilo” tada termo element može biti kalibrisan na punom opsegu
- Za praktičnu upotrebu i za veće tačnosti se koriste poluprovodni ili otporni senzori za dobijanje referentne tačke u cilju stabilnog i tačnog očitavanja.
- Zašto se onda koristi termopar kada se dodaje još jedan senzor kao referentni? Zašto se ne koristi samo ovaj senzor?

Razlog za ovo je što legure u termoparovima mogu da se koriste na mnogo većim temperaturama na kojima inače nebi mogli poluprovodni senzori da se koriste. Za termoparove je ta gornja granica temperature oko 1800°C .

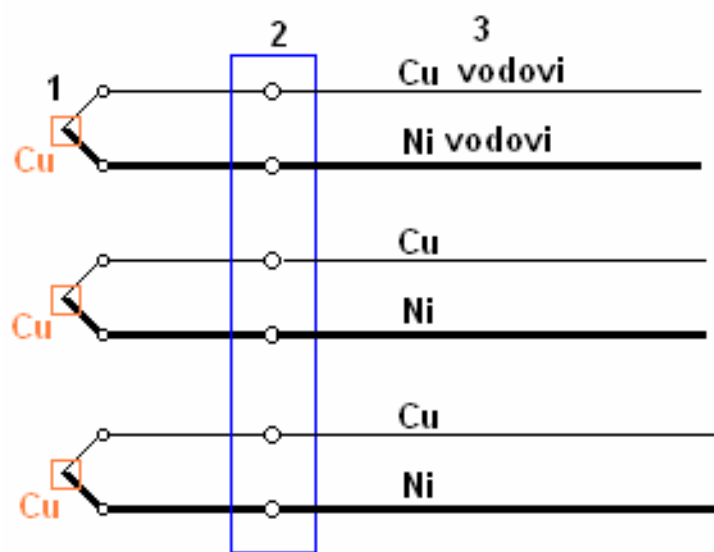
STANDARNI OPSEZI TERMOPAROVA

•U industriji su standardizovane klasifikacije termoparova, koji inženjerima pružaju smernice kako da ih prilagode za svoj konkretan projekat. Standardni tipovi termoparova i njihovi radni opsezi su dati pregledno u tabeli. Kao što se iz tabele vidi standardni rasponi su od -250°C do 1750°C.

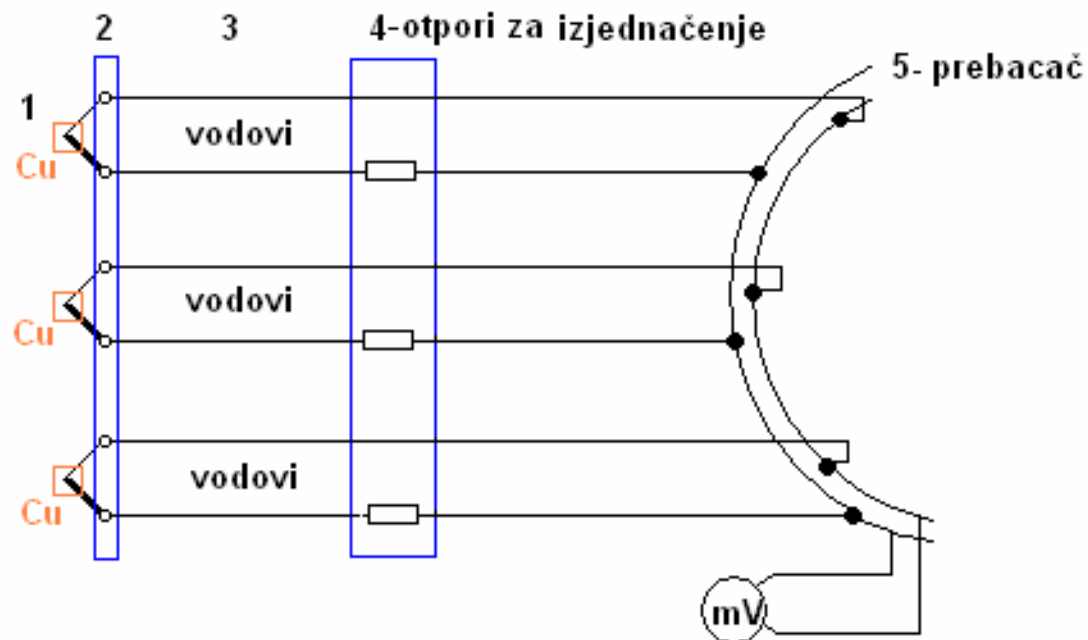
•Standardni poluprovodnici i materijali za lemljenje neće raditi a čak ni preživeti ove dve krajnosti!!!!

Tip	Temperaturni opseg (°C) (kontinualno)	Temperaturni opseg (°C) (kratkotrajno)
K	0 do +1100	-180 do +1300
J	0 do +750	-180 do +800
N	0 do +1100	-270 do +1300
R	0 do +1600	-50 do +1700
S	0 do +1600	-50 do +1750
B	+200 do +1700	0 do +1820
T	-185 do +300	-250 do +400
E	0 do +800	-40 do +900
Chromel/AuFe	-272 do +300	

STANDARNO POVEZIVANJE TERMOPAROVA



Retko korišćena konfiguracija



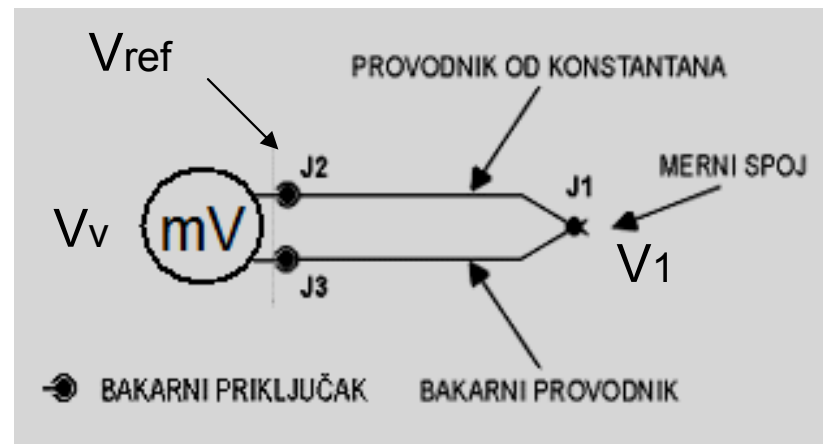
Često korišćena konfiguracija sa kompenzacijom "hladnog spoja"

KOMPENZACIJA HLADNOG SPOJA BEZ UPOTREBE LEDENOG KUPATILA?

U praktičnim aplikacijama, tablice za termoparove se transformišu u polinome, koji su lakši za korišćenje. Step en aproksimirajućeg polinoma zavisi od tipa korišćenog termopara i zahtevane tačnosti merenja.

Komponente kao što su termistori, otporni temperaturni senzori (RTD) i poluprovodnički senzori omogućavaju merenje apsolutne temperature referentnog spoja.

PROCEDURA:



1 korak	Meri se T_{ref} i izračunava se ekvivalentni napon za parazitne spojeve (V_{ref})
2 korak	Meri se V_v i dodaje se V_{ref} da bi se dobio V_1
3 korak	Pretvara se V_1 u traženu temperaturu T_1

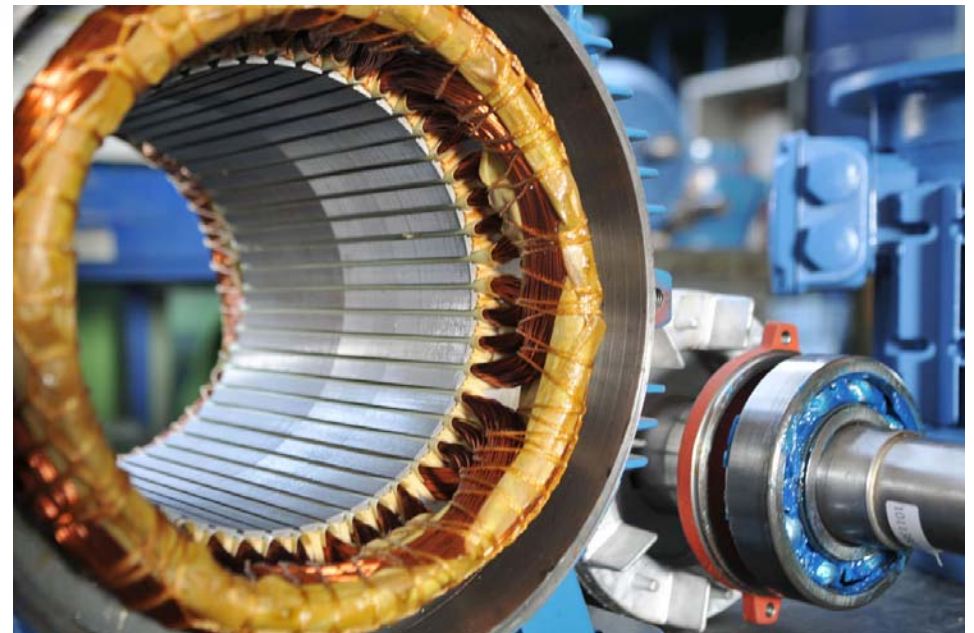
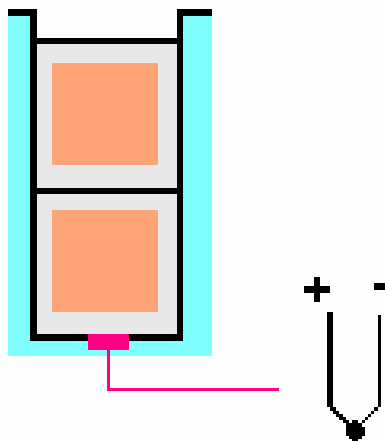
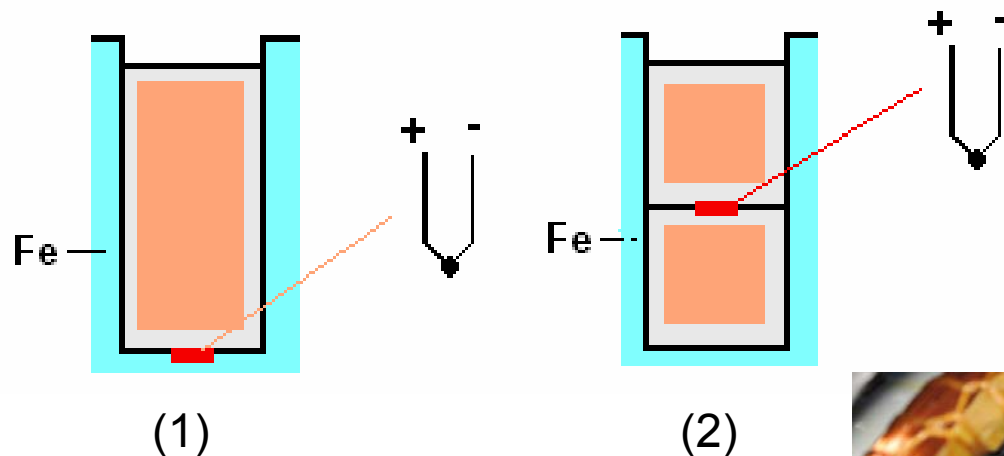
Ovaj postupak se naziva kompensacija "hladnog spoja", jer se uračnava uticaj referentnog spoja.

NAJČEŠĆE KORIŠĆENI TERMO-PAROVI (TERMO-SPREGOVI)

- Najčešće korišćeni termo-spregovi su BAKAR-KONSTANTAN (Cu 60% i Ni 40%) ili GVOŽĐE-KONSTANTAN (Fe 60% i Ni 40%) načinjeni od izolovanih provodnika prečnika $D \approx 1\text{mm}$.
- Termo-elektromotorna sila (TEMS) za spreg BAKAR-KONSTANTAN je oko $4.3\text{mV}/100^\circ\text{C}$ (opseg primene ovog termo-sprega je $-200^\circ\text{C} \dots +600^\circ\text{C}$), dok je za GVOŽĐE-KONSTANTAN oko $5.6\text{mV}/100^\circ\text{C}$ (opseg primene ovog termo-sprega je $-200^\circ\text{C} \dots +900^\circ\text{C}$); klase tačnosti 1.5 - 3%
- Veliki problem predstavlja milivoltni naponski signal i njegova dalja obrada i prilagođenje na neki od standardnih mernih opsega (strujni 0-20mA DC, 4-20mA DC, 0-1VDC , 0-10VDC)
- Dužine termospregova variraju (a samim tim i njihove otpornosti), kao i debljina žice od koje su sačinjeni.
- Na osnovu poslednje dve tvrdnje, postoje specijalni zahtevi u izradi mernog sistema

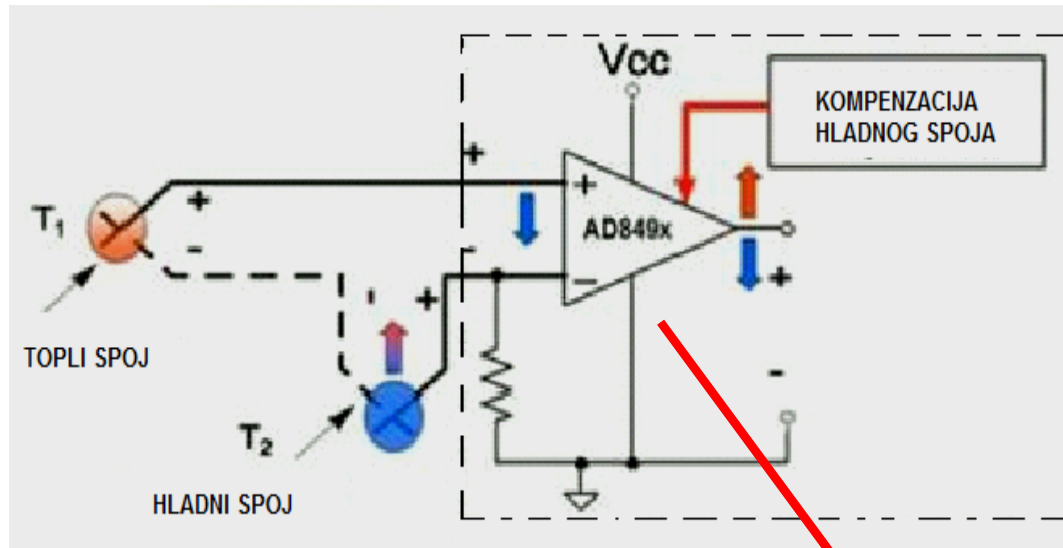
MERENJE TEMPERATURE GVOŽDA I BAKRA U ŽELEBOVIMA MAŠINA

- Radi merenja temperature aktivnog gvožđa (1) spojeni krajevi termosprega se izoluju i stave na dno žleba
- Za merenje temperature bakra (2) spojeni krajevi termosprega se stavljaju između dva sloja u žlebu



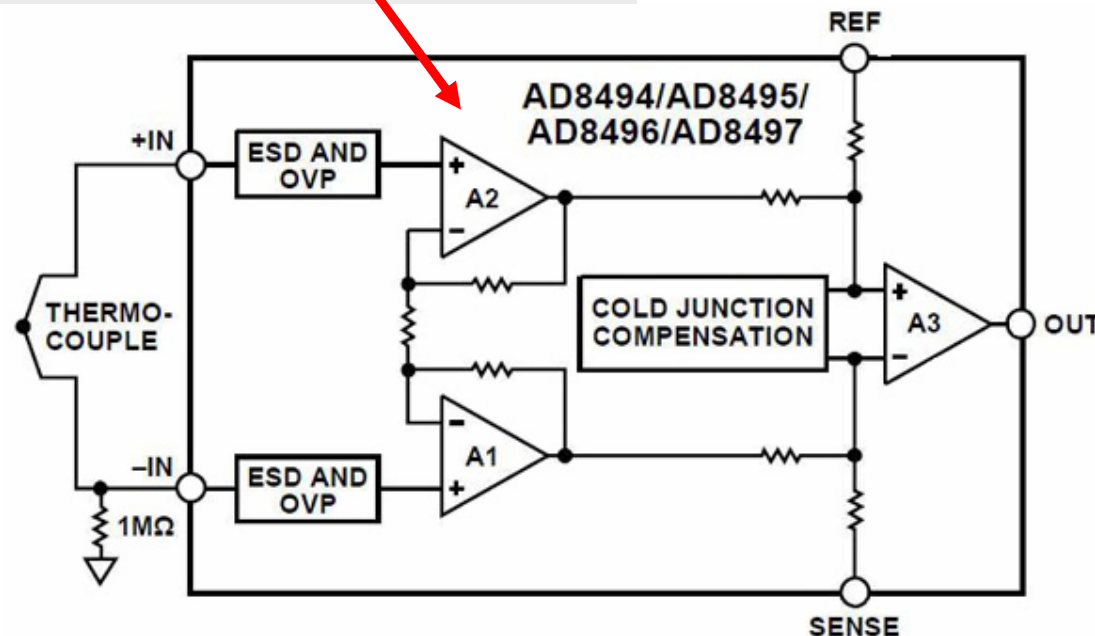
ELEKTRONSKO KOLO ZA KOMPENZACIJU TEMPERATURE “HLADNOG SPOJA”

Čip AD849X od Analog Devices

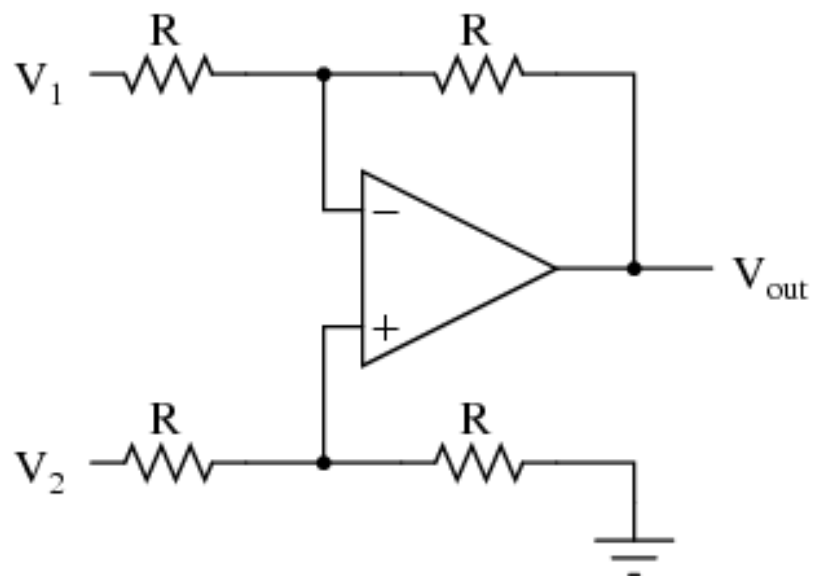


U primenama obrade signala sa termoparova zahteva se diferencijalno pojačanje mV signala, odnosno ELEKTRONSKI DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ

Jedan veoma pogodan je AD8494...7 od renomirane firme ANALOG DEVICES



DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ (standardna izvedba)



$$V_{(-)} = V_{(+)} = V_2 (R/2R) = V_2/2$$

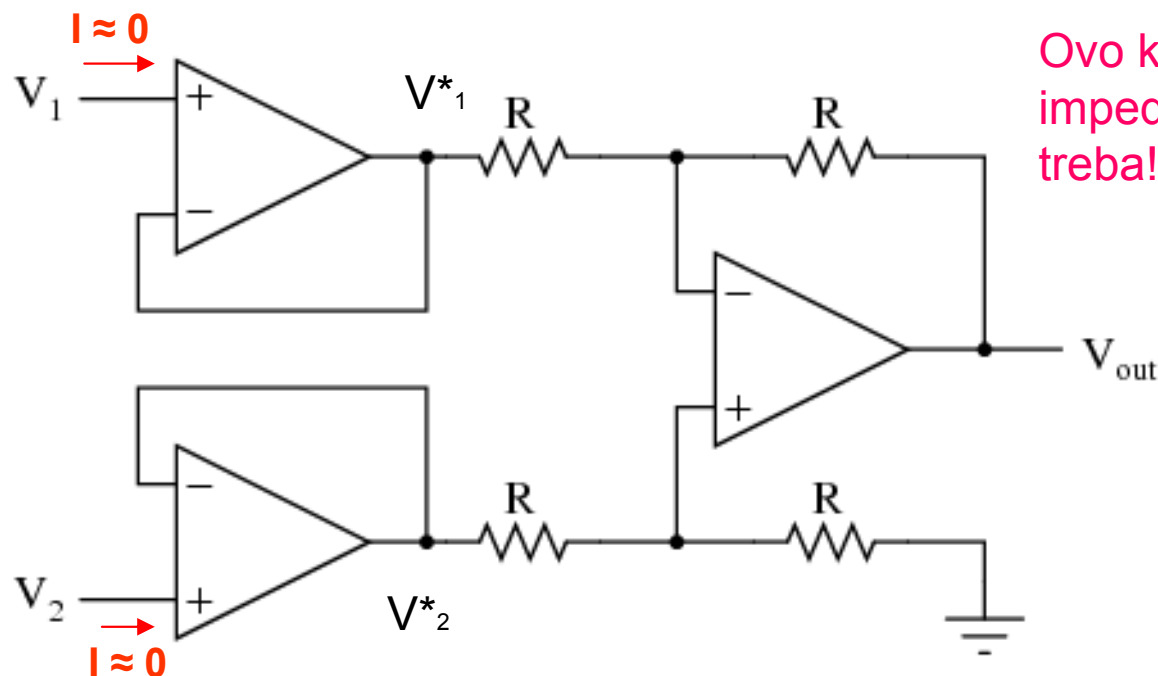
$$V_1 - V_{out} = 2R (V_1 - V_{(-)})/R$$

$$V_1 - V_{out} = 2 (V_1 - V_{(-)})$$

$$V_1 - V_{out} = 2V_1 - V_2$$

$$V_{out} = V_2 - V_1$$

DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ (sa baferisanim diferencijalnim ulazima)



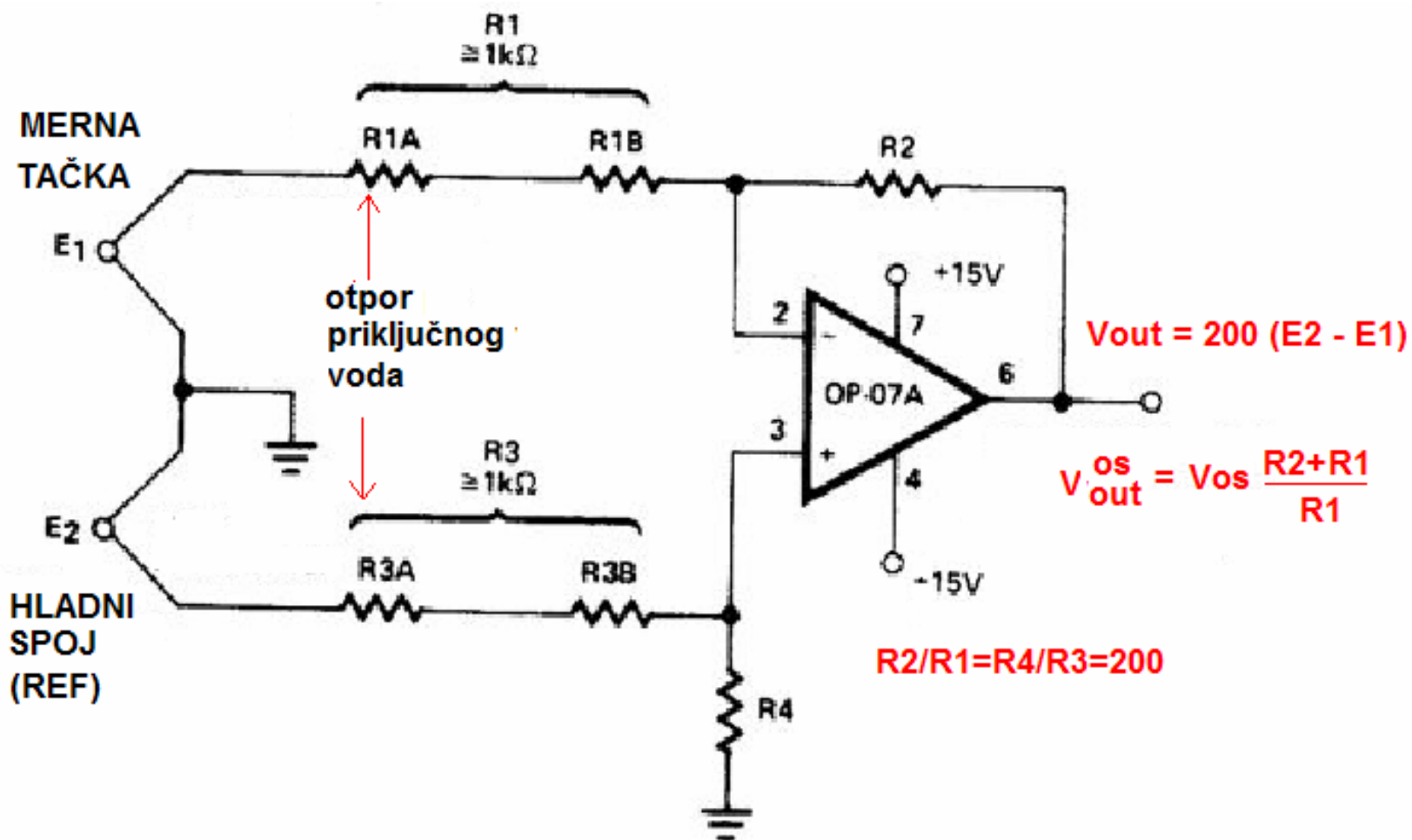
Ovo kolo ima veoma veliku ulaznu impedansu!! A to nam upravo i treba!!.

$$V_{out} = V^*_2 - V^*_1$$

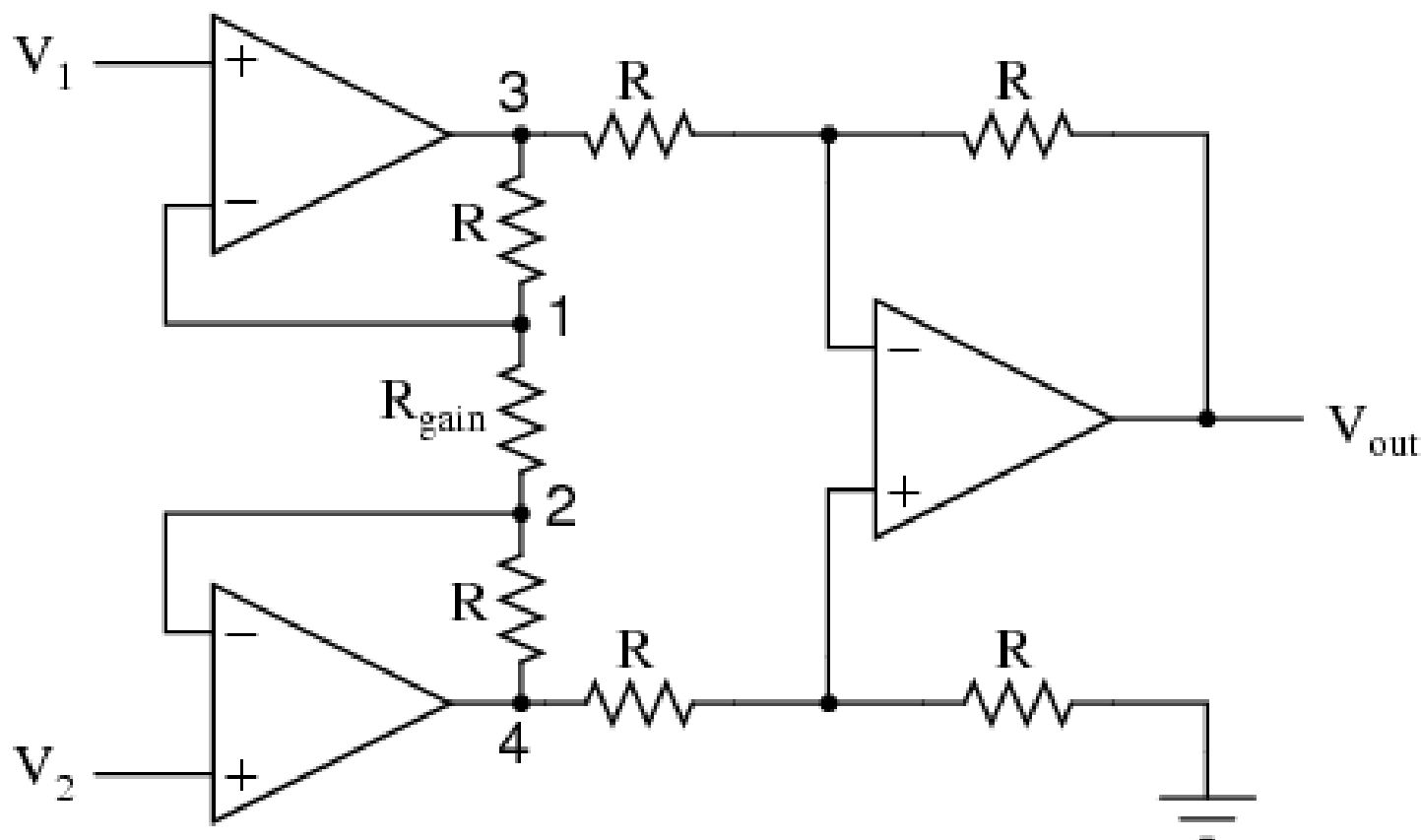
$$V^*_1 = V_1 \quad V^*_2 = V_2$$

$$V_{out} = V_2 - V_1$$

KONKRETNO ELEKTRONSKO MERNO KOLO SA DIFERENCIJALNIM POJAČAVAČEM



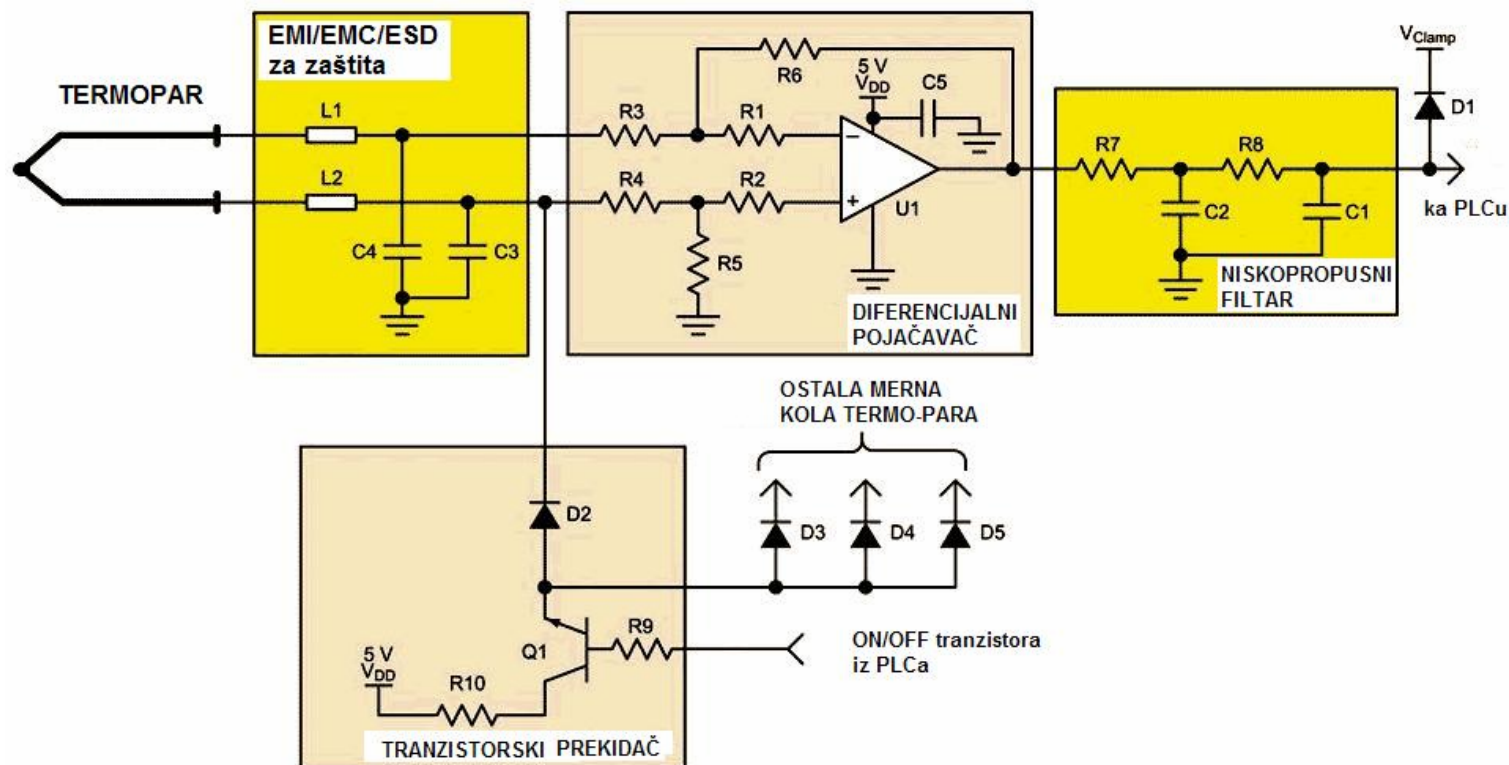
ELEKTRONSKO KOLO SA VISOKOM ULAZNOM IMPEDANSOM i PODEŠLJIVIM POJAČANJEM KOJE SE NAJČEŠĆE KORISTI U PRAKSI



$$V_{out} = V_{3-4} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R}{R_g} \right)$$

Podešavanje pojačanja diferencijalnog pojačavača se ostvaruje sa R_g

DETEKCIJA PREKIDA ili KRATKOG SPOJA NA TERMOPARU?



Veoma često mora biti detektovan prekid ili kratak spoj na termo-parovima i njihovim spojnim provodnicima. Kada su u pitanju naponski milivoltni (mV) signali ovo detektovanje je izuzetno teško. Konvencionalna rešenja se baziraju na korišćenju ton-generatora i refleksija na vodu ili strujnim test kolima. Ali ove metode predstavljaju skupa rešenja. Kolo na slici predstavlja jedno prihvatljivo i jednostavno rešenje. U normalnom režimu rada tranzistor Q je OFF i diferencijalni pojačavač sa U1 pojačava signal. Mikrokontroler (ili PLC) povremeno ga testira uključivanjem Q1 i monitorisanjem izlaza na NF filtru. Kada je Q1 ON tokom normalnog rada, on injektuje DC signal koji je određen sa R10, R4, R5. Na ovaj način se superponira DC strujni signal kroz otpornost i signal sa priključaka termo-para što dovodi do pojave DC jednosmernog signala na ulazu u U1. U ovom slučaju je signal na NF izlazu veći u odnosu na slučaj kada je Q1 OFF. Kada je termopar u prekidu, U1 automatski postaje bafer sa jediničnim pojačanjem i stoga izlaz U1 raste na nekoliko volti. Mikrokontroler prepoznaje ovaj porast (u odnosu na slučaj kada je Q1 OFF) i na korektan način detektuje prekid. Diode D1 i D2 dozvoljavaju da se ova tehnika može primeniti na više termoparova u jednoj aplikaciji. Otpori R1 i R2 služe da zaštite ulaze U1 u incidentnim situacijama kao što su: kratak spoj provodnika termopara sa pozitivnim naponom napajanja.

PREDNOSTI I MANE TERMOPAROVA

PREDNOSTI:

- Mogu se postavljati i na nepristupačna mesta
- Direktno pokazuju porast temperature iznad temperature okoline (a ovaj porast propisi upravo i definišu)
- Relativno veliki temperaturni opseg ($-200^{\circ}\text{C} \dots +1600^{\circ}\text{C}$)

Cu-Konstantan opseg $-200^{\circ}\text{C} \dots +600^{\circ}\text{C}$

Fe-Konstantan opseg: $-200^{\circ}\text{C} \dots +900^{\circ}\text{C}$

NiCr-Ni opseg : $0^{\circ}\text{C} \dots +1200^{\circ}\text{C}$

PtRh-Pt opseg : $0^{\circ}\text{C} \dots +1600^{\circ}\text{C}$

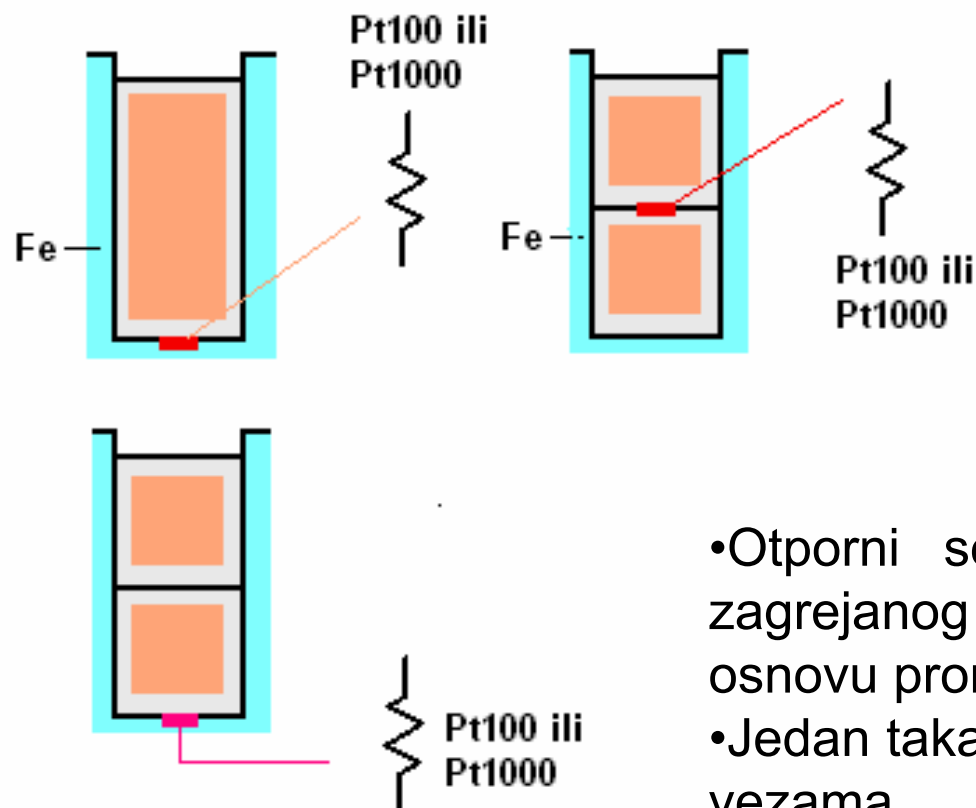
NEDOSTACI:

- Nedovoljna tačnost (moguće su relativne greške i do 3%)
- Pri slabljenju kontakata, kao i samog spoja, merni uređaj pokazuje nižu temperaturu od stvarne. Zašto?
- Mali izlazni signal (mV) i specijalni zahtevi za mernim kolom

OTPORNI TERMOMETRI (TERMOSENZORI)

- Danas se kao senzori za merenje temperatura u električnim mašinama i transformatorima koriste otpornički termometri
- Naročito kod velikih mašina se ugrađuje i po nekoliko desetina ovih pokazivača (detektora) ili mernih senzora
- Njihova najveća prednost u odnosu na termoparove je veća tačnost merenja (greška se kreće od 1-2%) i manje su strožiji uslovi u pogledu merne opreme
- Otporni senzori temperature mere temperaturu zagrejanog mesta (a ne porast temperature kao termoparovi) i to na osnovu promene otpora.
- Jedan takav otpornik se postavlja u žlebu (ili u postavi žleba) ili bočnim vezama (kada su u pitanju električne mašine) i u namotajima ili magnetnom kolu (kada su u pitanju transformatori)

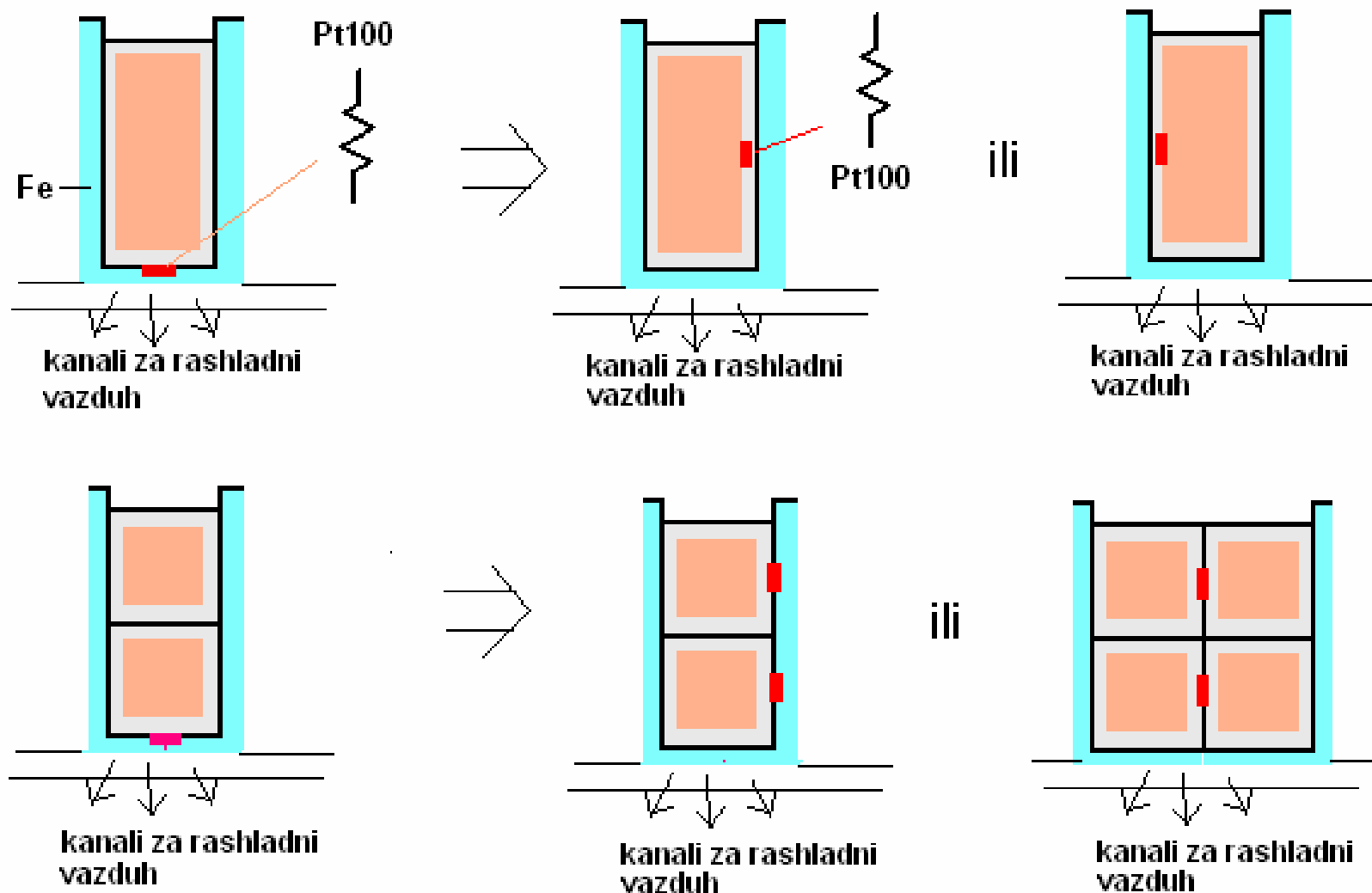
POSTAVLJANJE OTPORNIH TERMOMETARA U ŽLEBOVIMA ELEKTRIČNIH MAŠINA



Primenjuju se kao materijali bakar Cu ili platina Pt. Bolje je koristiti platinu odnosno Pt100 senzor jer ima veću otpornost (100Ω) na 0°C u odnosu na Cu. Stoga se najčešće koriste Pt100 senzori (ređe se koriste Pt1000 senzori)

- Otporni senzori temperature mere temperaturu zagrejanog mesta (a ne porast temperature) i to na osnovu promene otpora.
- Jedan takav otpornik se postavlja u žlebu ili bočnim vezama
- Za razliku od termoparova pri slabljenju kontakta u ovom slučaju se ima indikacija više temperature nego što ona stvarno jeste
- Na ovaj način su mašine preventivno zaštićene
- Primenjuju se različiti oblici ovih senzora (pljosnati i cilindrični), zavisno od mesta gde se postavljaju

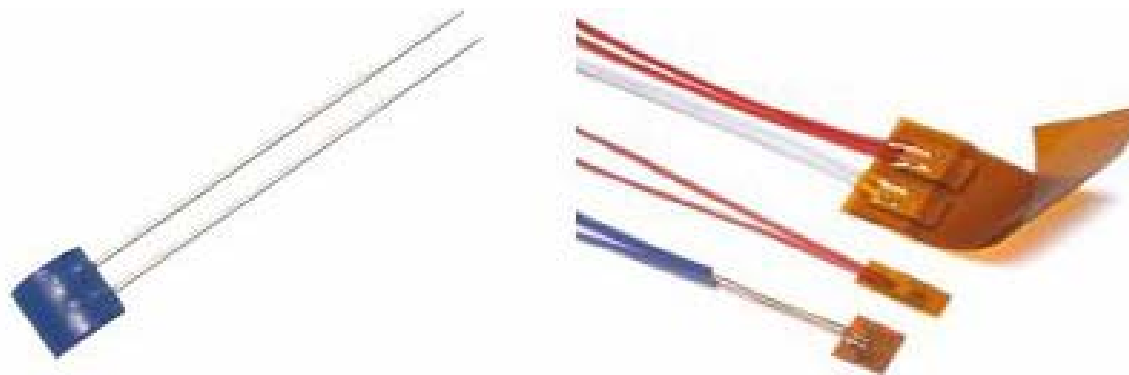
POSTAVLJANJE Pt100 na bočnim stranama žleba?

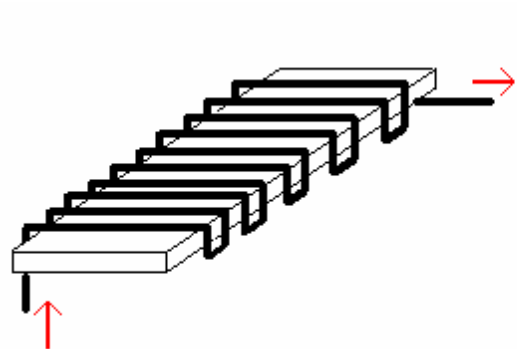


Ako pri dnu žleba prolaze kanali za rashladni vazduh onda se otporni senzori postavljaju na bočnim stranama, kao što je pokazano na slici

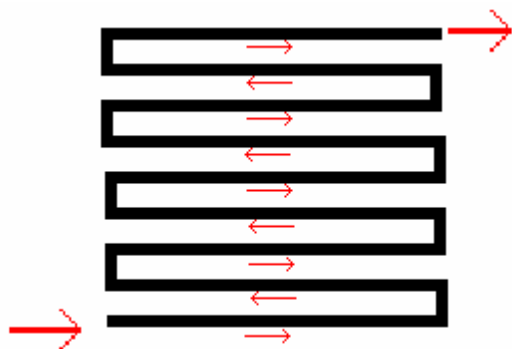
PLJOSNATI OTPORNI TERMOSENZORI

- Pljosnati termosenzori su oblika uzane veoma tanke trake od tvrdog izolacionog materijala
- Na ovu traku je bifilarno motana tanka bakarna ili platinska žica. Najčešće se koristi platinska žica jer ima veću otpornost na 0°C
- **Zašto se baš mota bifilarno?**
- Na kraju su traka i žica zajedno obložene izolacionim materijalom
- Ovi senzori se postavljaju u žlebu između slojeva ili na dno žleba mašine

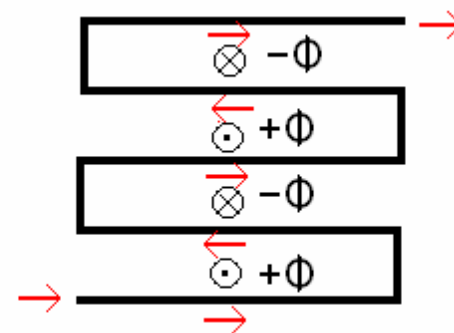




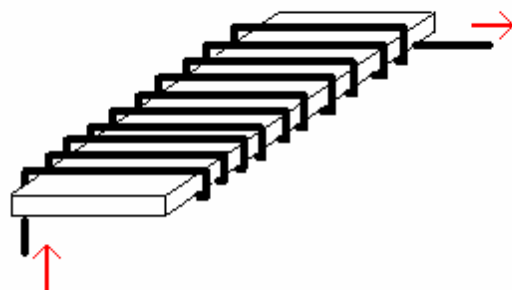
BIFILARNO MOTANJE
Pt ili Cu ŽICE



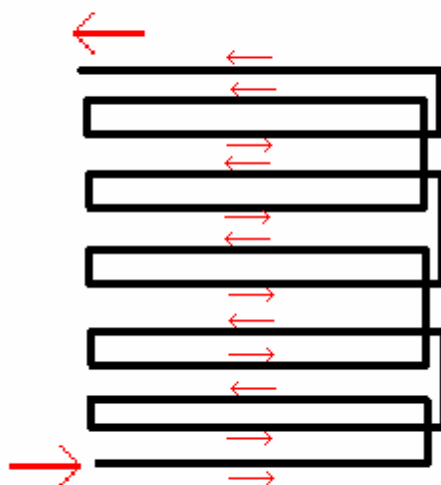
DISPOZICIJA
MOTANJA



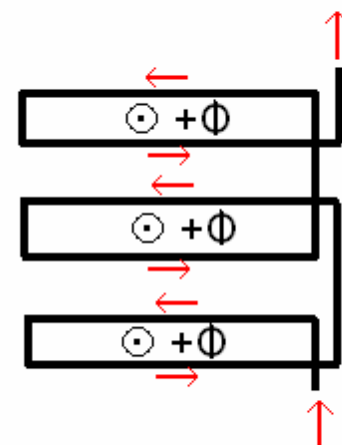
UKUPNI RASIPNI FLUKS
 $\Sigma \Phi \approx 0$



OBIČNO MOTANJE
Pt ili Cu ŽICE



DISPOZICIJA
MOTANJA

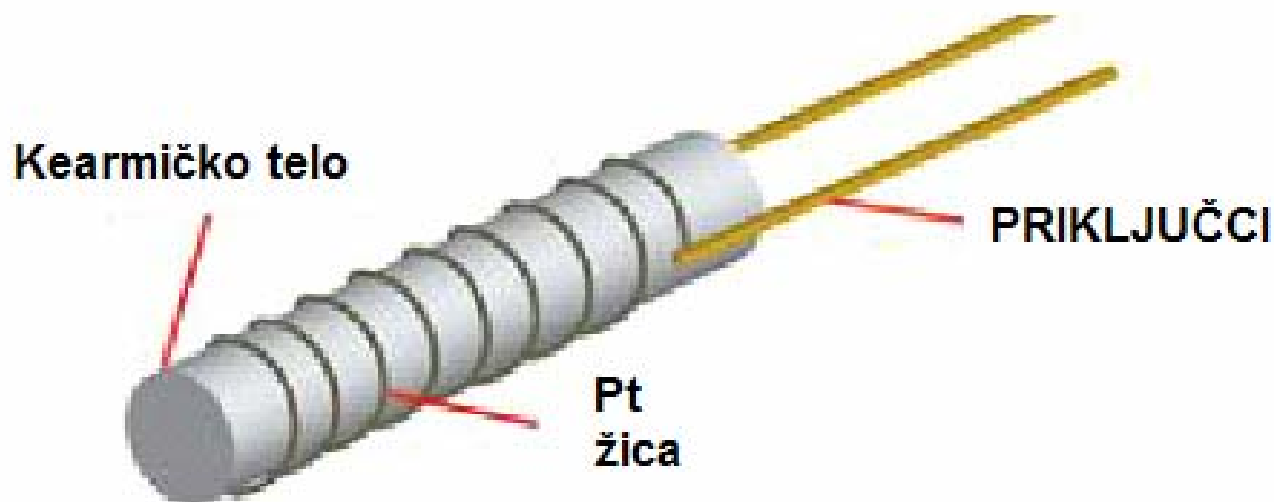


UKUPNI RASIPNI FLUKS
 $\Sigma \Phi \gg 0$

Bifilarnim motanjem Pt ili Cu žice na pljosnato telo značajno se smanjuje rasipni fluks u odnosu na slučaj običnog motanja žice. Manji rasipni fluks podrazumeva i manju rasipnu (parazitnu) induktivnost. Inače rasipna induktivnost može uticati na uspostavljanje struje u senzoru, kao i na indukovanje i pojavu naponskih šumova od strane rasipnog fluksa u žlebovima. Teži se da je ova rasipna induktivnost i rasipni fluksevi svedu na minimum.

CILINDRIČNI OTPORNI TERMOSENZORI

- U ovom slučaju je platinska ili bakarna žica namotana oko cilindričnog štapa (od keramike) i hermetički zaptivena u metalnoj futroli
- I u ovom slučaju se teži da se smanji rasipni fluks i rasipna parazitna induktivnost samog senzora.
- Sa smanjenjem rasipne induktivnosti ima se brže uspostavljanje merne struje i smanjuje se naponski šum, tako da je merenje preciznije
- Ovi senzori su pogodni za merenje temperature rashladnih fluida, gasova i tečnosti u cevima (na primer rashladni sistemi generatora)



TIPOVI TERMOSENZORA I NJIHOVE KARAKTERISTIKE OTPORNOSTI

- Obično se koriste dva tipa ovih otpornih (najčešće platinskih) termosenzora Pt100 i Pt1000.
- Standardizovana vrednost otpora na 0°C je 100Ω (za Pt100) i 1000Ω (za Pt1000)
- Imaju veoma linearnu karakteristiku;
- $R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (v - v_0)]$, $\alpha_{Pt} = 1/260$, $\alpha_{Cu} = 1/235$,
- Temperaturni koeficijent za platinu je manji od temperaturnog koeficijenta za bakar, ali je zato specifična otpornost Pt šest puta veća od specifične otpornosti bakra: $\rho_{Pt} \approx 6 \cdot \rho_{Cu}$. Ovo znači da je za konstrukciju termosenzora sačinjenog od Pt potrebno 6 puta manje materijala u odnosu na slučaj kada bi on bio sačinjen od Cu
- za Pt100, $R_0 = 100\Omega$ i $R_0 \cdot \alpha_{Pt} = 100/260 = 0.385$, pa se može pisati:

$$R[\Omega] = 100 + 0.385 \cdot v[^\circ\text{C}] \quad \text{ili}$$

$$R/100 = 1 + 0.00385 \cdot v[^\circ\text{C}]$$

Zavisnost otpora od temperature za Pt

Relacije koje se koriste u praksi:

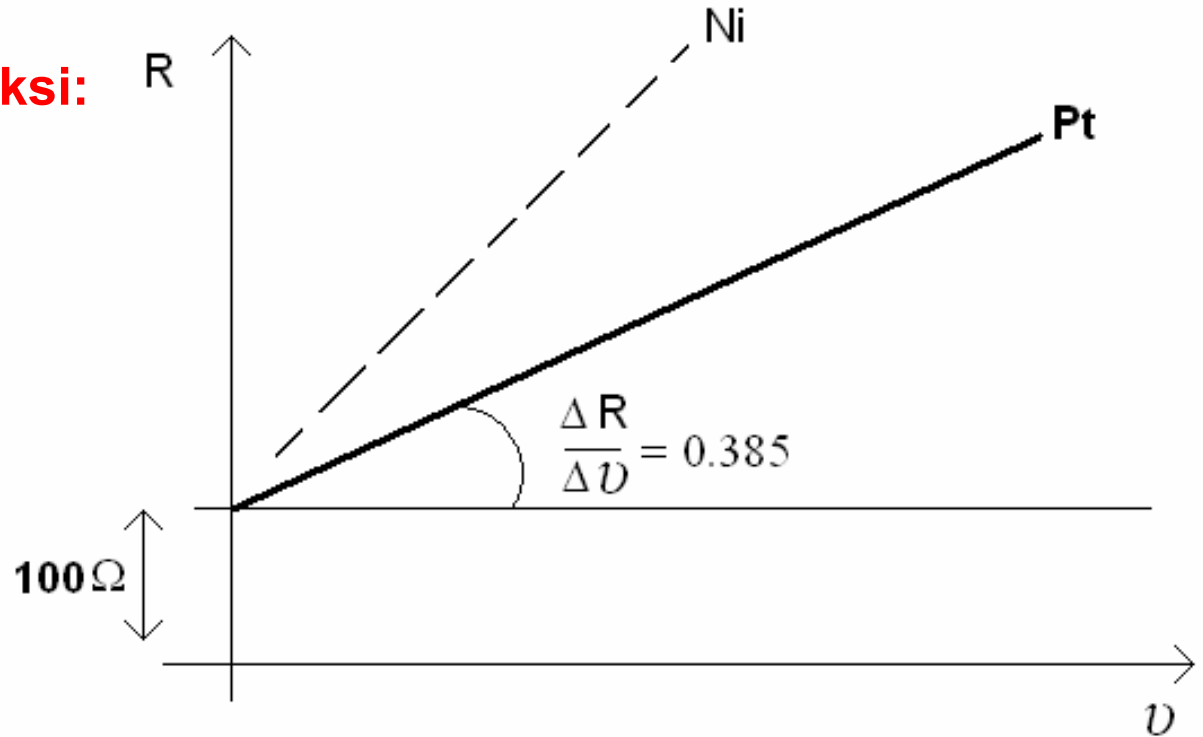
$$R = 100 + 0.385 \cdot t$$

ili

$$R/100 = 1 + 0.00385 \cdot t$$

ili

$$R/100 = (260 + t)/260$$



-Ova zavisnost je data u tabelama proizvođača tako da se relativno jednostavno mogu očitati vrednosti otpornosti za datu temperaturu i obrnuto

-Kako se vrši merenje temperature?

TABELA: zavisnosti otpornosti u (Ω) od temperature u ($^{\circ}\text{C}$) za Pt 100

$^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$^{\circ}\text{C}$
-200.00	18.52										-200.00
-190.00	22.83	22.40	21.97	21.54	21.11	20.68	20.25	19.82	19.38	18.95	-190.00
-180.00	27.10	26.67	26.24	25.82	25.39	24.97	24.54	24.11	23.68	23.25	-180.00
-170.00	31.34	30.91	30.49	30.07	29.64	29.22	28.80	28.37	27.95	27.52	-170.00
-160.00	35.54	35.12	34.70	34.28	33.86	33.44	33.02	32.60	32.18	31.76	-160.00
-150.00	39.72	39.31	38.89	38.47	38.05	37.64	37.22	36.80	36.38	35.96	-150.00
-140.00	43.88	43.46	43.05	42.63	42.22	41.80	41.39	40.97	40.56	40.14	-140.00
-130.00	48.00	47.59	47.18	46.77	46.36	45.94	45.53	45.12	44.70	44.29	-130.00
-120.00	52.11	51.70	51.29	50.88	50.47	50.06	49.65	49.24	48.83	48.42	-120.00
-110.00	56.19	55.79	55.38	54.97	54.56	54.15	53.75	53.34	52.93	52.52	-110.00
-100.00	60.26	59.85	59.44	59.04	58.63	58.23	57.82	57.41	57.01	56.60	-100.00
-90.00	64.30	63.90	63.49	63.09	62.68	62.28	61.88	61.47	61.07	60.66	-90.00
-80.00	68.33	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.11	64.70	-80.00
-70.00	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73	-70.00
-60.00	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73	-60.00
-50.00	80.31	79.91	79.51	79.11	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73	-50.00
-40.00	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70	-40.00
-30.00	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67	-30.00
-20.00	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62	-20.00
-10.00	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55	-10.00
0.00	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	0.00
0.00	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	0.00
10.00	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10.00
20.00	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	20.00
30.00	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	30.00
40.00	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	40.00
50.00	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	50.00
60.00	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	60.00
70.00	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	70.00
80.00	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	80.00
90.00	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	90.00

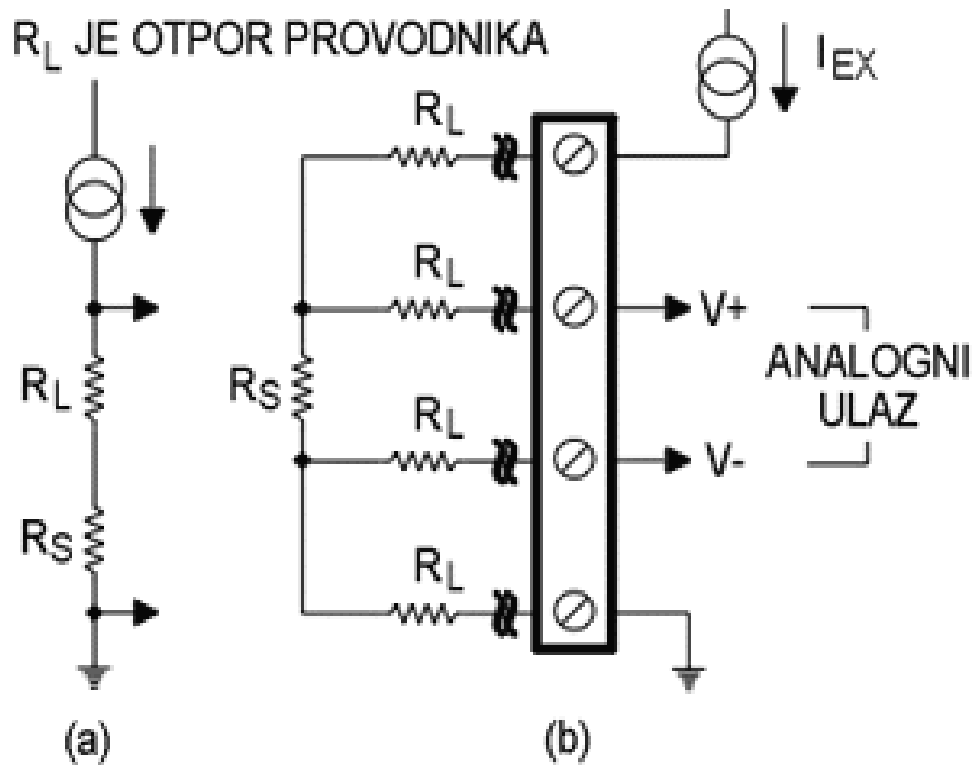
TABELA (nastavak) zavisnosti otpornosti u (Ω) od temperature u ($^{\circ}\text{C}$) za Pt 100

$^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$^{\circ}\text{C}$
100.00	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	100.00
110.00	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69	110.00
120.00	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46	120.00
130.00	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21	130.00
140.00	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95	140.00
150.00	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68	150.00
160.00	161.05	161.43	161.80	162.17	162.54	162.91	163.29	163.66	164.03	164.40	160.00
170.00	164.77	165.14	165.51	165.89	166.26	166.63	167.00	167.37	167.74	168.11	170.00
180.00	168.48	168.85	169.22	169.59	169.96	170.33	170.70	171.07	171.43	171.80	180.00
190.00	172.17	172.54	172.91	173.28	173.65	174.02	174.38	174.75	175.12	175.49	190.00
200.00	175.86	176.22	176.59	176.96	177.33	177.69	178.06	178.43	178.79	179.16	200.00
210.00	179.53	179.89	180.26	180.63	180.99	181.36	181.72	182.09	182.46	182.82	210.00
220.00	183.19	183.55	183.92	184.28	184.65	185.01	185.38	185.74	186.11	186.47	220.00
230.00	186.84	187.20	187.56	187.93	188.29	188.66	189.02	189.38	189.75	190.11	230.00
240.00	190.47	190.84	191.20	191.56	191.92	192.29	192.65	193.01	193.37	193.74	240.00
250.00	194.10	194.46	194.82	195.18	195.55	195.91	196.27	196.63	196.99	197.35	250.00
260.00	197.71	198.07	198.43	198.79	199.15	199.51	199.87	200.23	200.59	200.95	260.00
270.00	201.31	201.67	202.03	202.39	202.75	203.11	203.47	203.83	204.19	204.55	270.00
280.00	204.90	205.26	205.62	205.98	206.34	206.70	207.05	207.41	207.77	208.13	280.00
290.00	208.48	208.84	209.20	209.56	209.91	210.27	210.63	210.98	211.34	211.70	290.00
300.00	212.05	212.41	212.76	213.12	213.48	213.83	214.19	214.54	214.90	215.25	300.00
310.00	215.61	215.96	216.32	216.67	217.03	217.38	217.74	218.09	218.44	218.80	310.00
320.00	219.15	219.51	219.86	220.21	220.57	220.92	221.27	221.63	221.98	222.33	320.00

MERNI SISTEMI KOJI SE KORISTE KOD OTPORNIH TEMPERATURNIH SENZORA

- Kao analogni merni sistem za merenje temperature se može koristiti instrument sa ukrštenim kalemovima (logometar). Ovo je “stara” metoda, koja je veoma otporna na smetnje i šumove, te se i dalje koristi u praksi.
- Tačnije merenje je zasnovano na korišćenju mernih mostova i pripadajuće merne elektronike!!! Analogne i digitalne. Ali su ovi načini jako podložni smetnjama i šumovima te tome treba posvetiti značajnu pažnju!!!
- PREDNOST: Temperatura se meri kada je mašina pod opterećenjem ili na VN, ili u toku ogledu zagrevanja (što nije bio slučaj kod metode bazirane na promeni otpora)
- MANE: Priključni kontakti unose dodatni pad napona pa to utiče na tačnost merenja; rasipna (parazitna) induktivnost utiče na dinamiku procesa i pojavu šumova

ASIMETRIČNI I KELVINOV SPOJ



Asimetrični spoj

Kelvinov spoj sa 4 priključka

Pretpostavimo da imamo 100Ω senzor na bazi Pt. Da bi se kontrolisalo unutrašnje samozagrevanje, nivo pobude je obično ograničen na 2 mA. Uzimajući da je osetljivost ovakvog tipa elementa oko

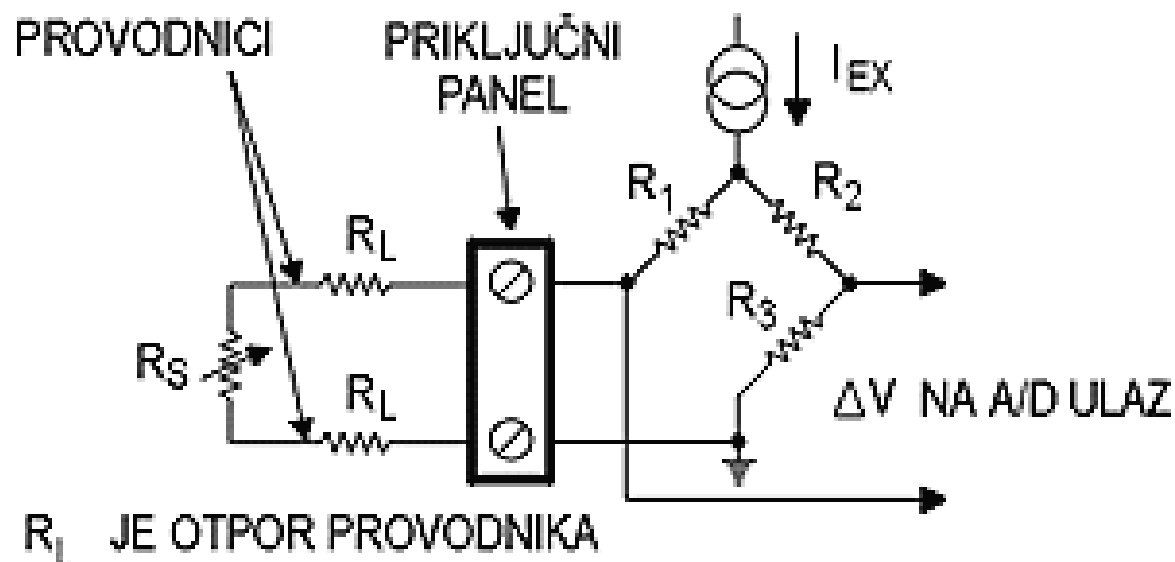
$+ 0.4 \Omega / ^\circ\text{C}$, onda će izlaz biti oko $0.8 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Ovo je veoma mali signal koji zahteva pojačanje. Za dobro korišćenje celog opsega A/D konvertora (obično 5V ili 10V) signal mora da se pojača 100 ili 1000 puta. Međutim, mirni napon na senzoru RTD je :

$$2 \text{ mA} \times 100 \text{ Oma} = 0.2 \text{ V}.$$

Ovo ograničava najveće pojačanje na 10 puta, kada se koristi asimetrični spoj. Tako na primer u 12-bitnom sistemu, najmanja promena temperature koja se može detektovati iznosi $0.5 ^\circ\text{C}$.

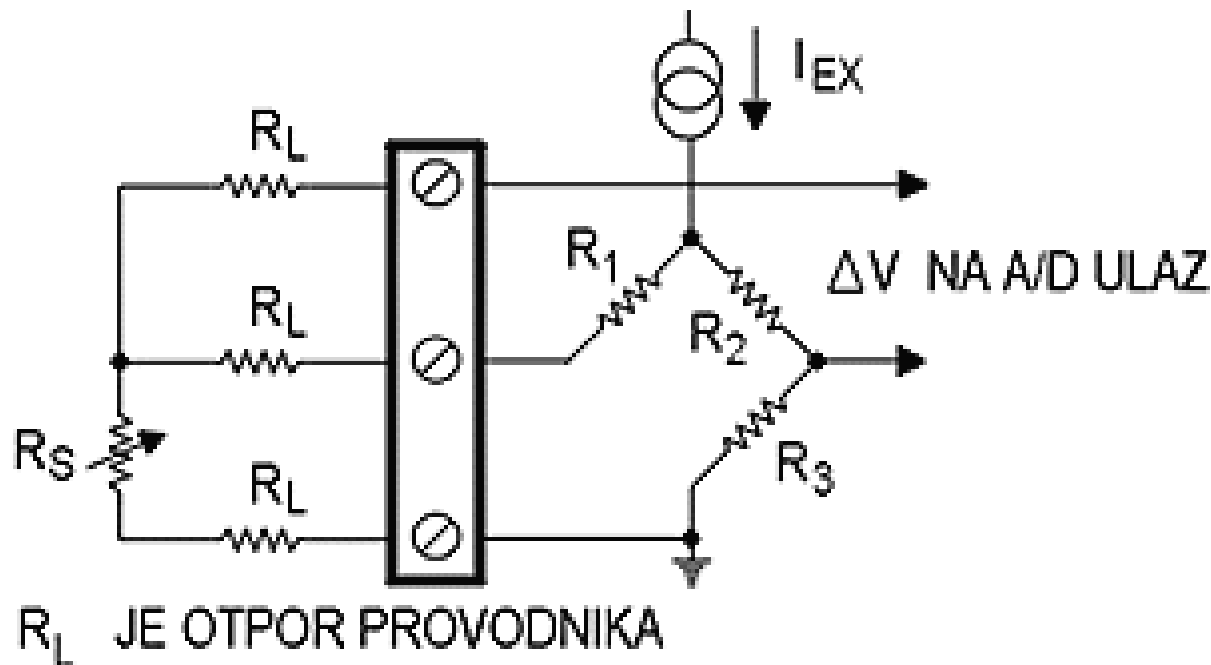
Kelvinov spoj ili spoj sa četiri priključka: Otpornost žice ne može da se eliminiše, ali ova merna tehnika uveliko smanjuje njen uticaj. Ideja je da se spoje dva provodnika na svaki kraj mernog senzora. Jedan provodnik je priključen za strujni izvor, a drugi meri napon na priključku. Struja je u ispitnom ili mernom provodniku vrlo mala i može se uzeti da je nula, zbog vrlo velike ulazne otpornosti sistema za akviziciju. Tako neće doći do pada napona na ispitnim linijama. Treba uočiti da pod ovim uslovima padovi napona u linijama (R_L) nisu u mernom kolu.

DVOŽIČNI SPOJ MOSTA



Dvožični most je vrlo jednostavan, ali postoji potencijalna mogućnost uticaja redne otpornosti provodnika. Otpornost provodnika ne može da se odvoji od otpornosti pretvarača. Zbog toga se ovakva konfiguracija obično ne koristi u aplikacijama koje zahtevaju visoku tačnost.

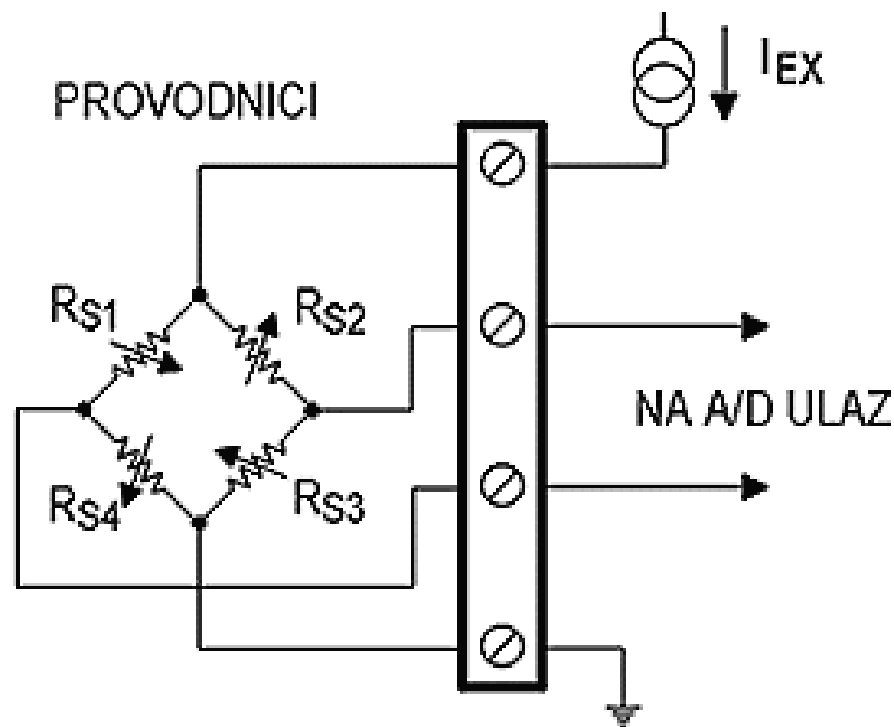
TROŽIČNI SPOJ MOSTA



Trožični most zahteva dodatni provodnik koji treba da se vodi do senzora (mana), ali treba imati u vidu da on obezbeđuje niz vrlo važnih prednosti; Ako napravimo pretpostavku da su dva provodnika koji vode struju do senzora od istog materijala i približno iste dužine, mnogi potencijalni izvori grešaka će biti kompenzovani.

Jedna otpornost provodnika je u gornjoj grani mosta, dok je druga otpornost provodnika u donjoj grani. Rezultat toga je da je uglavnom eliminisan uticaj otpornosti provodnika. Međutim, kada se koriste dugački provodnici (>30 m) ili se zahteva najveća moguća preciznost, može se koristiti softverska korekcija uticaja provodnika. Otpornost ispitnog provodnika je od vrlo malog značaja zato što je struja koja teče u njemu vrlo mala.

PUNI MOST



U ovom slučaju provodnici ne unose značajnu grešku. Oba spoljna provodnika napajanja su u rednoj vezi sa strujnim izvorom i tako ne utiču na pobudni nivo. Ovo kolo ima najveću osetljivost i najbolju linearnost, a ne zahteva dodatne otpornike za upotpunjavanje konfiguracije mosta. Cena ovog tipa senzora je relativno visoka!!!.

PROVERA OTPORNIH TERMOMETARA

- Provera otpornih termometara ulazi u prgram i procedure ispitivanja mašina u kojima su oni ugrađeni
- Provera se vrši merenjem električnog otpora pomoću jednosmerne struje u hladnom stanju, preciznim mostovima i merenjem temperature sa Hg termometrima
- Vrš se ustvari provera karakteristika otpornih termometara :

$$\text{Za BAKAR: } \frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + t_2}{235 + t_1}$$

$$\text{Za PLATINU: } \frac{R_2}{R_1} = \frac{260 + t_2}{260 + t_1}$$

$$R_1 = 100\Omega$$

$$t_1 = 0^\circ\text{C}$$

R_2 - izmereni otpor u $[\Omega]$

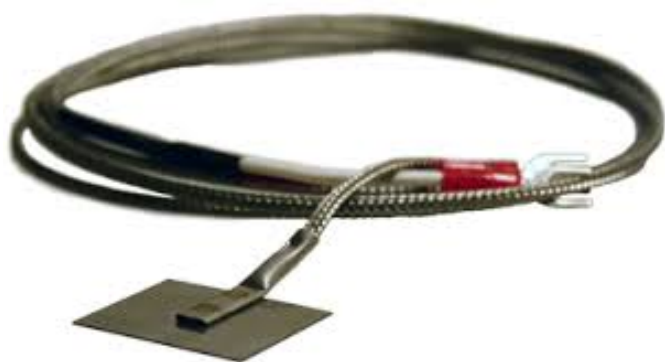
t_1 - izmerena temperatura u $[\text{°C}]$

- Jednosmerna struja pri kojoj se vrši merenje ne sme prelaziti nekoliko desetina milampera zbog greške usled zagrevanja. **Takođe se pri ovim ispitivanjima vrši i merenje otpora izolacije samih senzora!!!!**

LITERATURA

- Miloš Petrović, *Ispitivanje električnih mašina, Naučna knjiga, Beograd 1988.*
- *Signali i pretvarači- ELECTRONIC DESIGN*
<http://www.ed.rs/ed/tekstovi/principi/signali.htm>
- *Thermocouple circuit*
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Thermocouple_circuit.svg

HVALA NA PAŽNJI!!! PITANJA???



Beograd,
Oktobar 2015