



Temperatura je jedna od osnovnih intenzivna fizička veličina stanja pomoću koje se u termodinamici definira toplinska ravnoteža sistema. Temperatura je najčešće mjerena veličina u laboratoriju i u industriji. SI jedinica za temperaturu je kelvin, oznaka je K, i definiran je relacijom

$$1 \text{ K} = \text{temperatura trojne točke vode} / 273,16$$

Ravnopravno sa stupnjem K koristi se jedinica stupanj Celzusa, °C, i obje jedinice su iste po iznosu, ali je ishodište temperaturne skale pomaknuto tako da se odnose prema relaciji

$$T / \text{K} = 273,15 + t / ^\circ\text{C}$$



Internacionalna temperaturna skala 1990 (ITS-90)

Fiksne temperaturne točke za umjeravanje termometra

2

e-ravnoteža

orto-para vodika (helija),

V-parovito stanje,

T-trojna točka,

G-plin,

M-talište

F-krutište

broj	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}C$	tvar	stanje
1	3 to 5	-270.15 to -268.15	He	V
2	13.8033	-259.3467	e-H ₂	T
3	~17	~-256.15	e-H ₂ (or He)	V (or G)
4	~20.3	~-252.85	e-H ₂ (or He)	V (or G)
5	24.5561	-248.5939	Ne	T
6	54.3584	-218.7916	O ₂	T
7	83.8058	-189.3442	Ar	T
8	234.3156	-38.8344	Hg	T
9	273.16	0.01	H ₂ O	T
10	302.9146	29.7646	Ga	M
11	429.7485	156.5985	In	F
12	505.078	231.928	Sn	F
13	692.677	419.527	Zn	F
14	933.473	660.323	Al	F
15	1234.93	961.78	Ag	F
16	1337.33	1064.18	Au	F
17	1357.77	1084.62	Cu	F

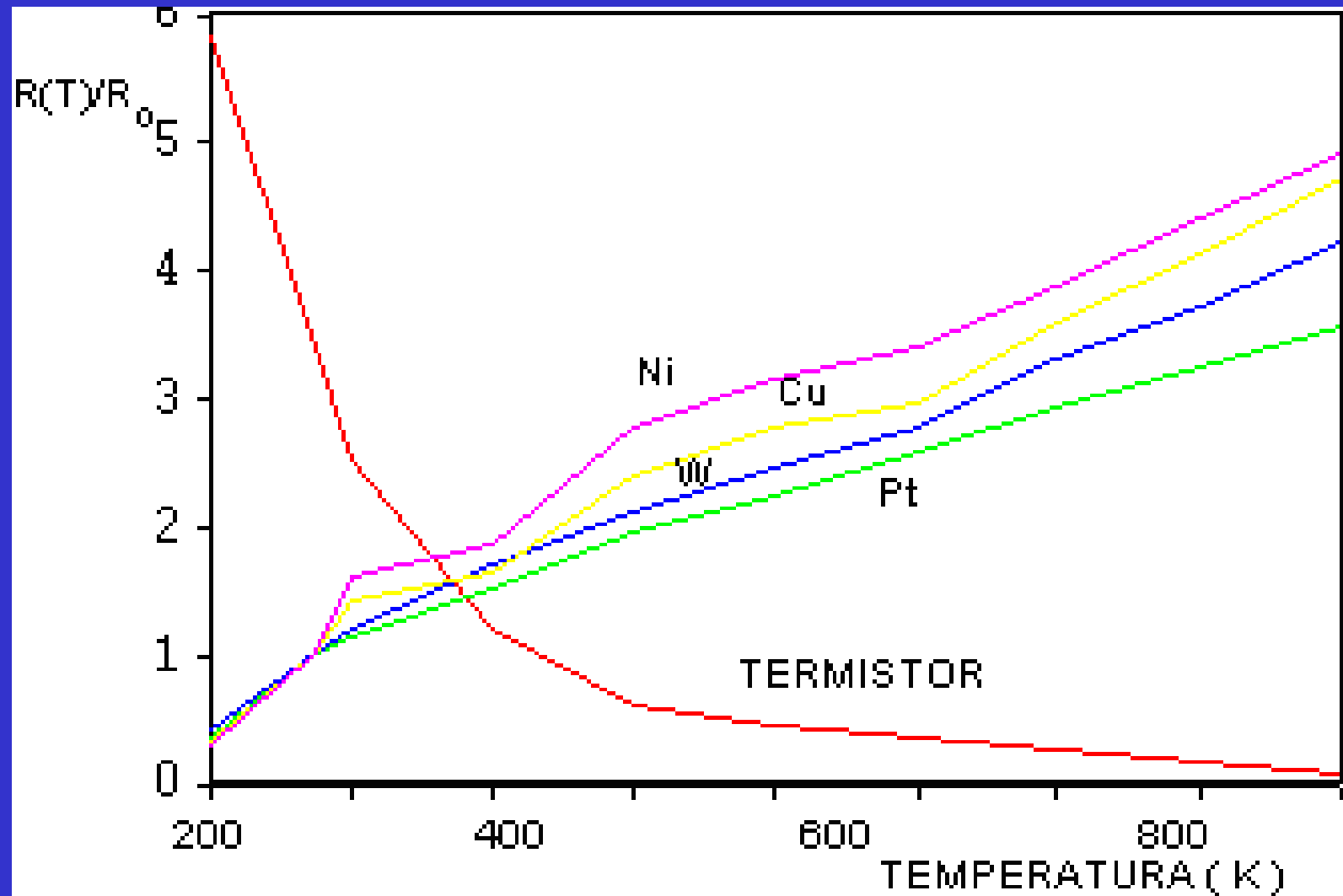


- dilatacijski termometri
- otpornički
- termočlanci
- radijacijski termometri



Otpornički termometri imaju električni otpor materijala kao mjerni signal temperature. Koriste se metali, čista Pt ili legure, i poluvodiči. Otpornički termometri izvedeni iz poluvodiča nazivaju se termistori. Najznačajniji otpornički termometar je izveden iz čiste platine, i najčešće je izveden tako da ima otpor od $100\ \Omega$ na temperaturi od $0\ ^\circ\text{C}$. Takav termometar naziva se Pt_{100} i upotrebljava se kao **standardni termometar**, propis IPTS68, za mjerno područje od 13,8 do 903,9 K.

Vodiči i poluvodiči imaju različiti mehanizam prijenosa naboja u materijalu. Kod metala se naboj prenosi gibanjem elektrona i šupljina u vodljivoj energetskej vrpce i povećanjem temperature povećava se električni otpor zbog intenzivnijeg raspršenja nosioca naboja na kristalnoj rešetci. Kod poluvodiča je prijenos naboja limitiran brojem nosilaca naboja u vodljivoj vrpce. Povećanjem temperature dolazi da prijelaza nosioca naboja iz nižih energetski vrpca u vodljivu tako da povećanje temperature kod termistora smanjuje električni otpor.



Zavisnost električnog otpora vodiča o temperaturi teško je teoretski izvesti sa dovoljnom točnošću za široki mjerni opseg, te se zbog toga koriste aproksimacije sa parametrima procijenjenim metodom najmanjih kvadrata. Najčešće se upotrebljava polinomna aproksimacija

$$R(T) = R_o \left[1 + \alpha \cdot (T - T_o) + \beta \cdot (T - T_o)^2 + \dots (T - T_o)^N \right]$$

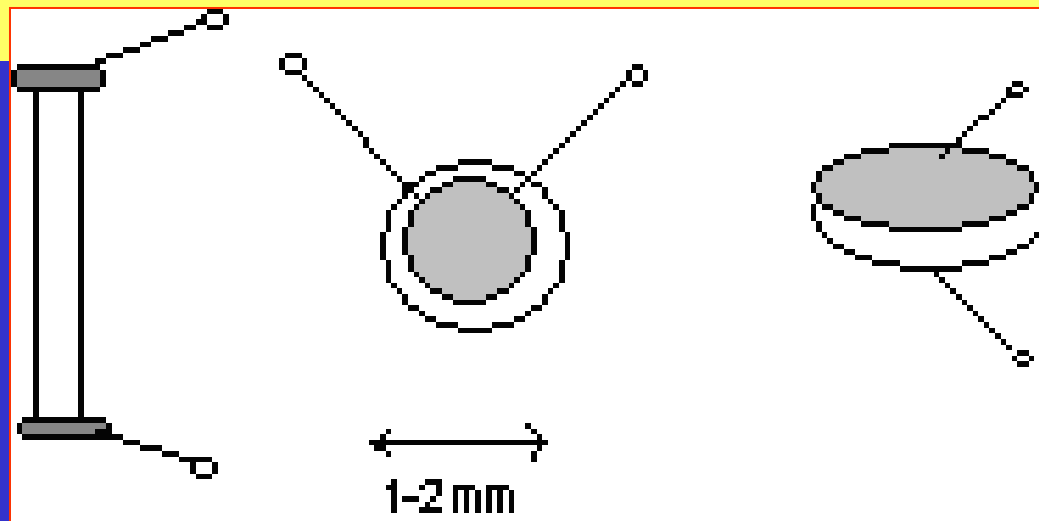
T_o je referentna temperatura, najčešće 0 °C, i R_o je referentni otpor na toj temperaturi. Parametri α, β i stupanj aproksimacije N određuju se tako da se postigne maksimalna točnost i pouzdanost aproksimacije.

Električni otpor termistora slijedi Boltzmanovu raspodjelu energije tako da se baždarana funkcija termistora najčešće piše u obliku

$$R(T) = R_o \cdot \exp \left[\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \right]$$

Tipična vrijednost otpora R_o je 3-20 k Ω na temperaturi od 300 K.

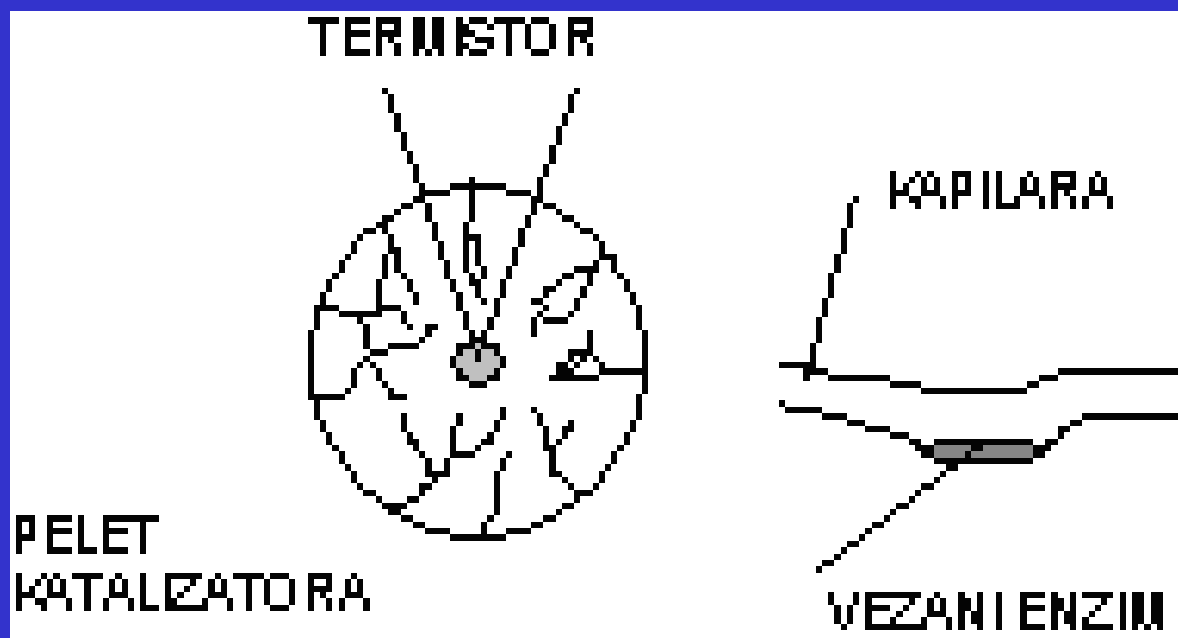
Termistori se odlikuju posebnim karakteristikama tako da su naročito prikladni za mjerenja gdje je potrebno postići vrlo malene vremenske konstante i veliku osjetljivost mjernog signala. To su smjese sulfida, selenida i oksida kovina kao što su Mg, Ni, Co, Cu, Fe itd. Takove smjese se prešaju u različite oblike, kao što su: kuglice, štapići, pločice itd.



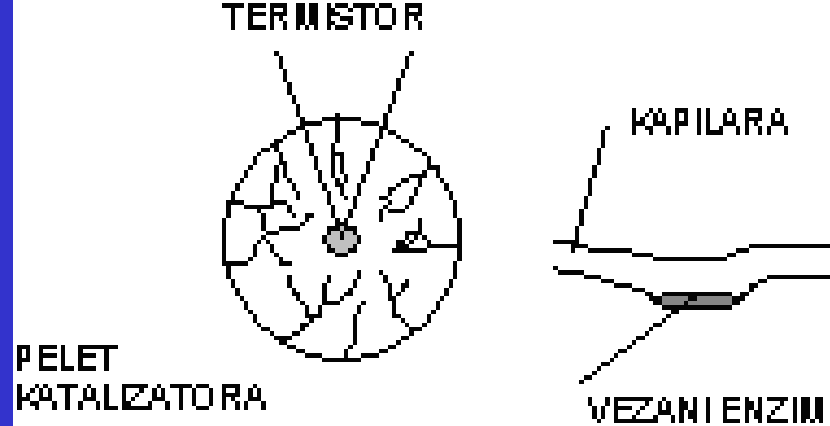
Osjetljivost mjernog signala termistora je vrlo velika, uobičajena vrijednost je od 1-500 $\Omega/\Omega K$ na temperaturi od 0 °C.



- veliki otpor
- velika osjetljivost mjernog signala
- nelinearna baždarna funkcija (za šire mjerne opsege)
- mala vremenska konstanata (postoje izvedbe sa $\tau \approx 1 \text{ ms}$)
- mala struja opterećenja, $I < 10 \text{ }\mu\text{A}$
- relativno nestabilna baždarna karakteristika, dužom upotrebom dolazi do trajnih promjena u poluvodiču i mijenja se karakteristika tako da je potrebno ponavljati baždarenje
- reproducibilnost temperature $\pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- točnost mjerenja je manja od standardnog Pt_{100} termometra



Termistori se koriste kao "enzim-termistori" za on-line mjerenje koncentracije specifičnih nutrienata ili produkata tijekom fermentacija



Enzim-termistor sastoji se od poroznog katalitičkog zrna na koji je vezan enzim koji katalizira specifičnu reakciju koja služi za dobivanje mjernog signala. Uglavnom se koriste enzimi oksidaze kojima se oksidiraju pojedini supstrati. Enzim je vezan u porama poroznog peleta i tijekom oksidacije se razvija toplina zbog koje dolazi do nadvišenja temperature u središtu peleta u odnosu na okolinu. Temperaturno nadvišenje je proporcionalno brzini enzimske reakcije, a brzina reakcije je funkcija koncentracija određena sa Michaelis-Mentenovim kinetičkim modelom. U središtu se nalazi osjetljivi termistor tako da se otpor termistora, odnosno temperatura koristi kao mjerni signal koncentracije.

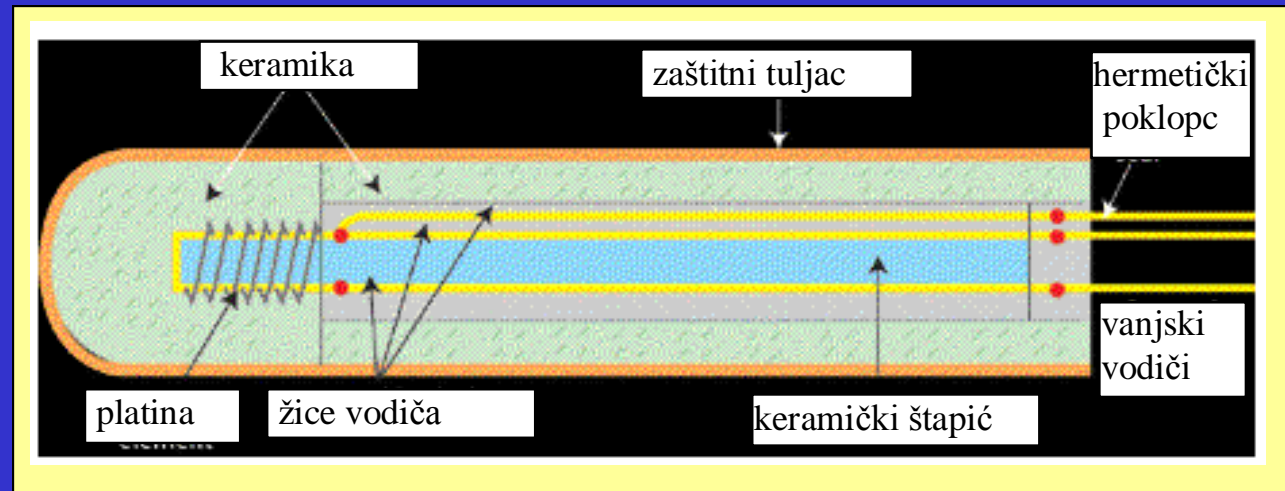
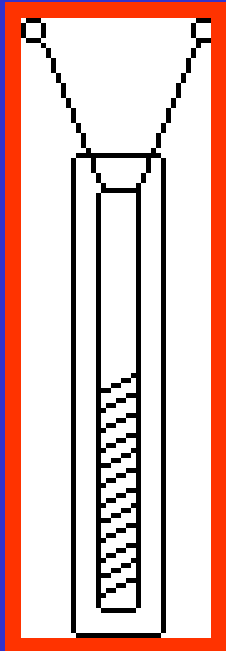


U tablici su dani podaci za neke enzim -termistore

1
1

SUPSTRAT	ENZIM	MJERNI OPSEG (mmol/l)
etanol	alkohol oksidaza	0,01 - 1
laktoza	lakto-oksidaza	0,05 - 10
glukoza	glukoza oksidaza	0,002 - 0,8

Standardni otpornički termometar je Pt₁₀₀. Izrađuje se iz tanke niti čiste platine koja je posebno mehanički i termički obrađena tako da ima stabilnu mikrokristaliničnu strukturu. Najčešće se koristi žica otpora 100 Ω na temperaturi od 0 °C, ali se upotrebljavaju i žice sa otporima 200 i 500 Ω .



Žica je namotana oko keramičkog štapića, ili je zalivena keramikom, i radi mehaničke zaštite nalazi se u zaštitnom mehaničkom tuljcu.



Mjerno područje Pt₁₀₀ termometra je od 13,8 do 1173 K, a kao standard koristi se u mjernom području od 13,8 do 903,9 K.

1
3

Baždarna funkcija je aproksimirana polinomom. Jednostavna aproksimacija je od Callendar-van Dusen dana sljedećim izrazima:

za $T/^{\circ}\text{C}$ od -200 do 0 $^{\circ}\text{C}$

$$R(T) = R_o \cdot \left[1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2 + \gamma \cdot T^3 \cdot (T - 100) \right]$$

za $T/^{\circ}\text{C}$ od 0 do 630 $^{\circ}\text{C}$

$$R(T) = R_o \cdot \left(1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2 \right)$$

parametri imaju sljedeće vrijednosti

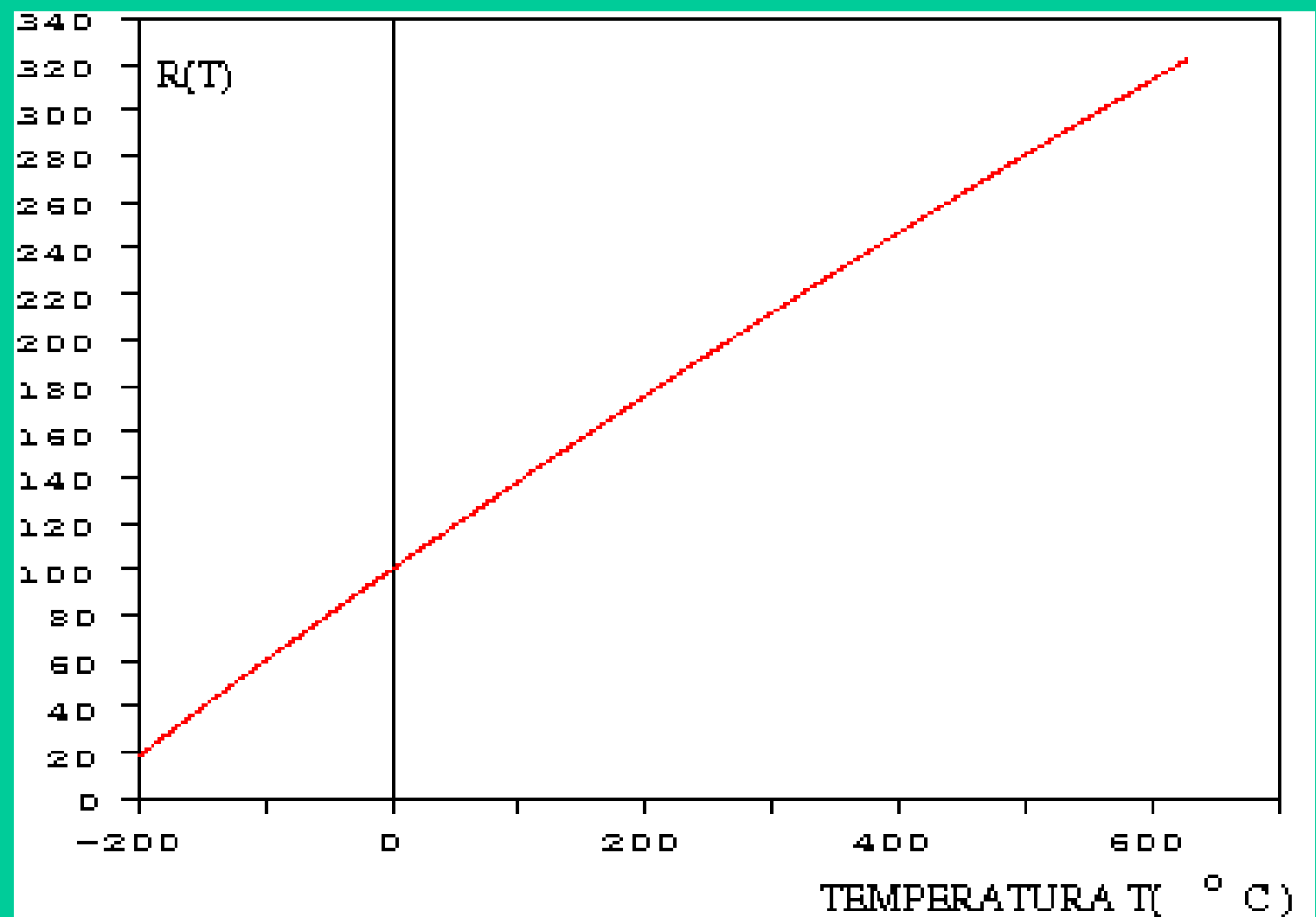
$$\alpha = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\beta = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

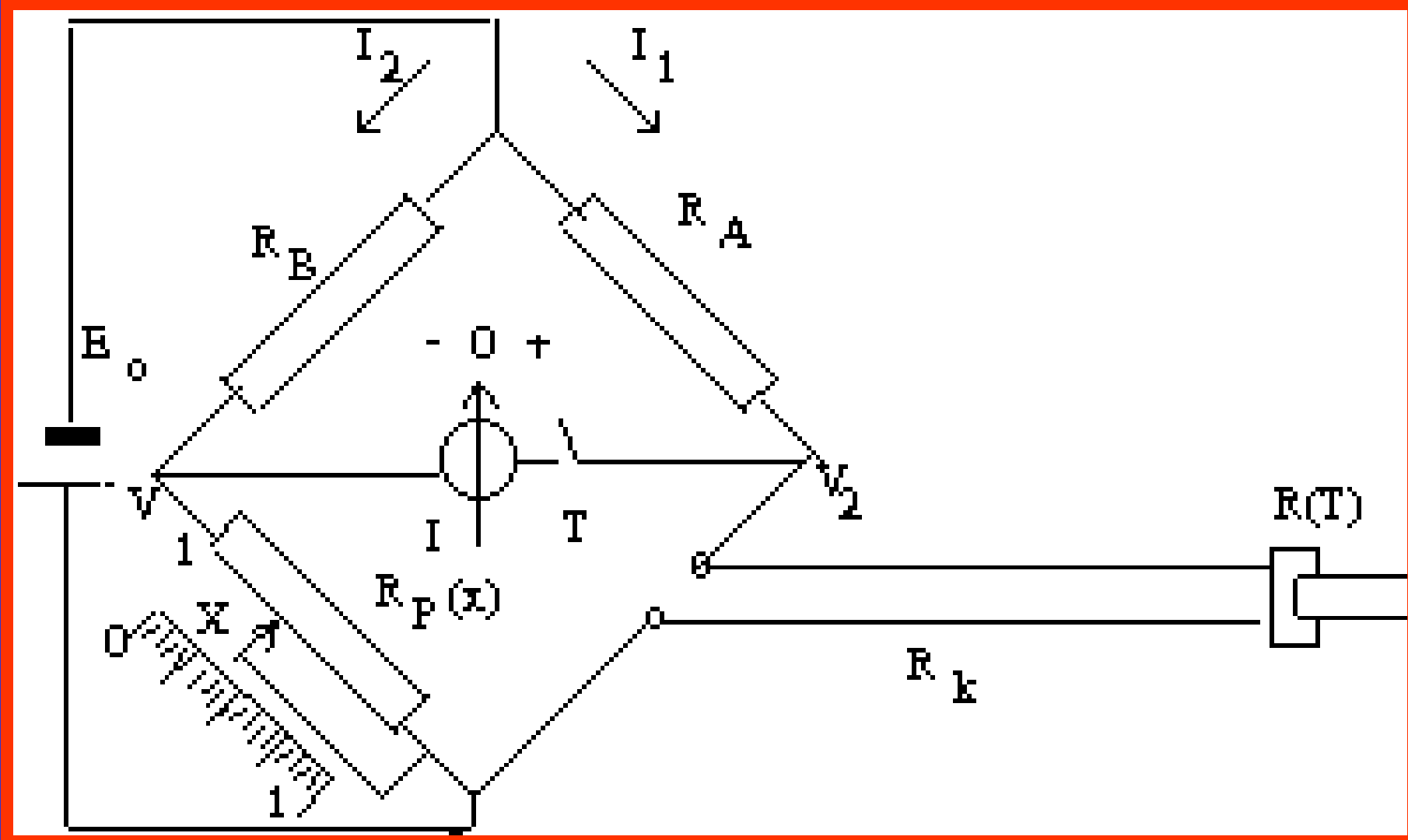
$$\gamma = -4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$$



maksimalna točnost mjerenja potrebno je uzeti u obzir odstupanja od linearnosti.



Slika 8. Baždarna krivulja standardnog otporničkog termometra Pt₁₀₀.





Termočlanci ili termoparovi su vrlo često upotrebljavani termometri za mjerenja temperature u laboratorijskim i industrijskim uvjetima.

Različitim izborom termočlanaka može se pokriti vrlo veliko mjerno područje, od vrlo niskih do vrlo visokih temperatura. Glavna prednost termočlanaka je njihova jednostavnost i neposredni električni mjerni signal.

Kada se razmatraju pojave koje nastaju zbog prijenosa topline i električne energije u vodičima onda su najvažniji

Seebackov,

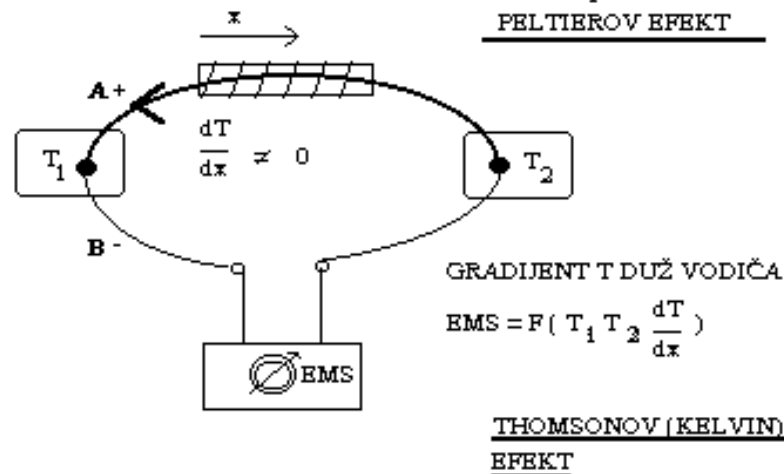
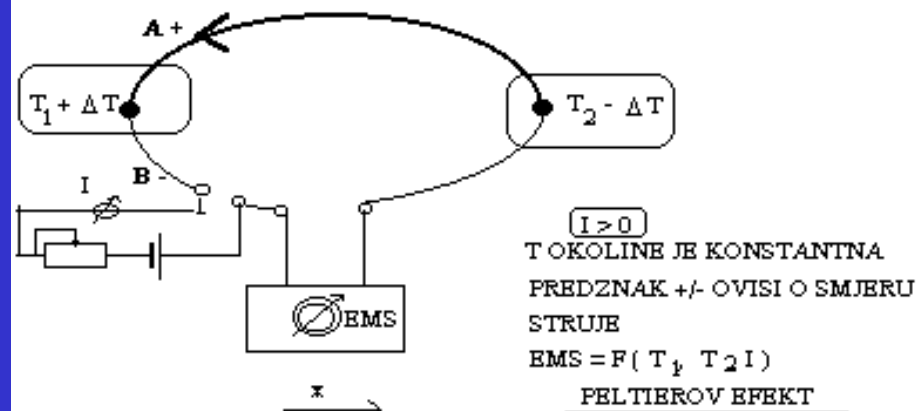
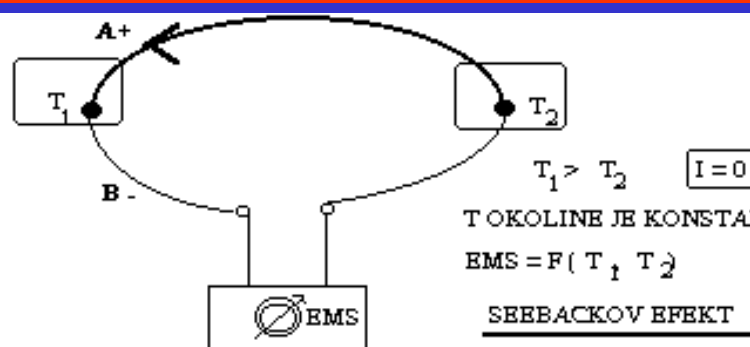
Za mjerenje temperature odlučan je
Seebackov efekt, otkrio ga je Seeback 1821.

Peltierov

Thomsonov efekt

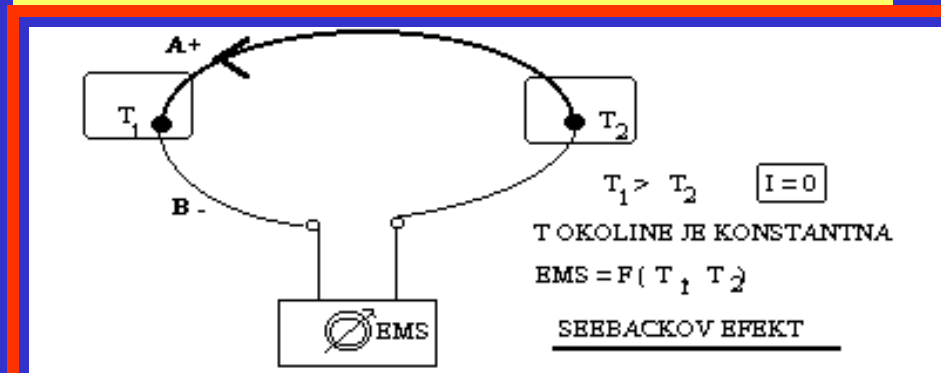
TERMO-ELEKTRIČNI EFEKTI

1
7



Seebackov efekt

1
8



U zatvorenom električnom krugu nalaze se dva vodiča iz različitih materijala označena sa A i B. Osim čistih metala i legura može se upotrijebiti i poluvodič. Krajevi metalnih vodiča su zavareni u dva čvorišta bez upotrebe trećeg metala. Čvorovi su na različitim temperaturama T_1 i T_2 .

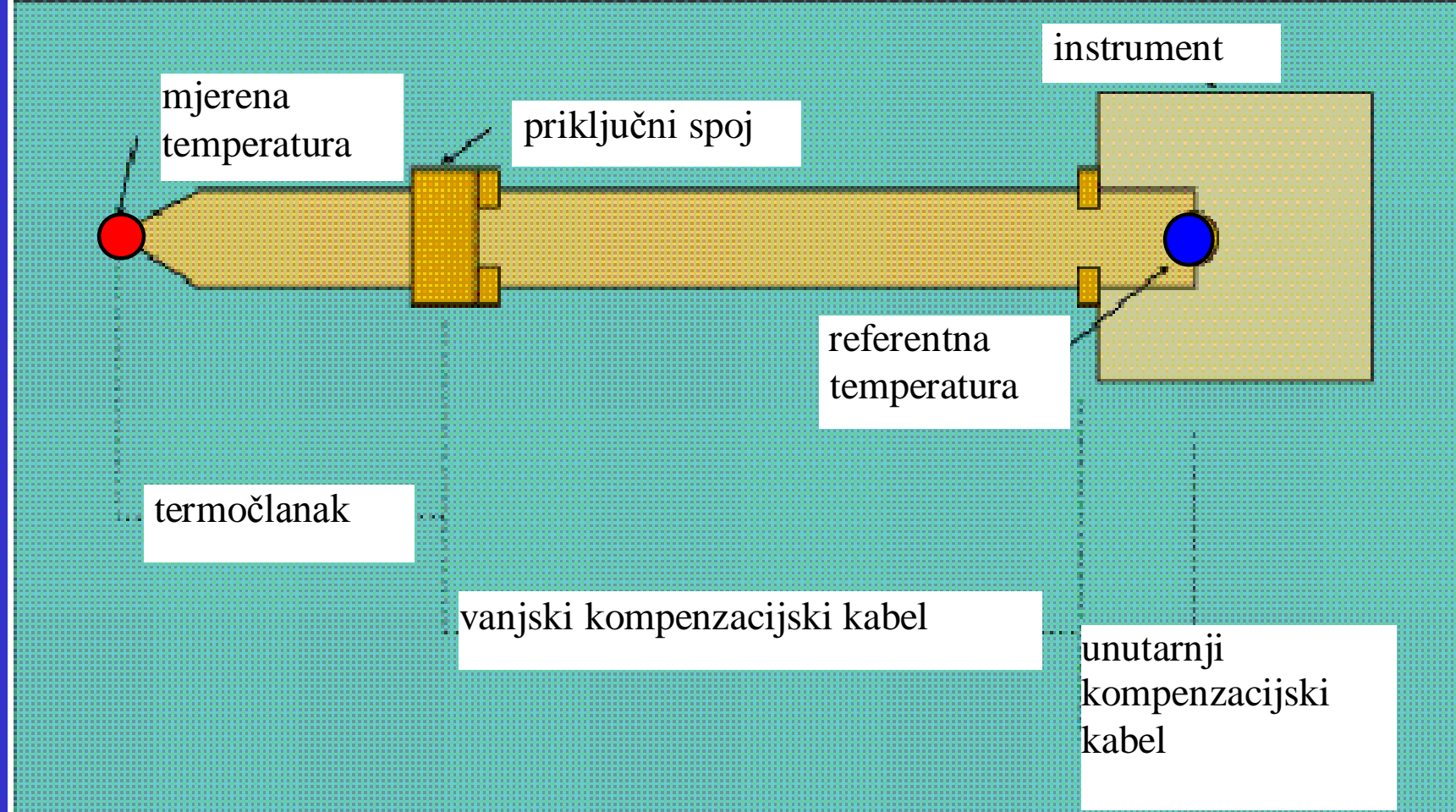
Ako se u krug priključi instrument za mjerenje elektromotorne sile EMS onda se može eksperimentalno utvrditi da u krugu postoji razlika potencijala. Ako se u krug umjesto kompenzatora za EMS uključi miliampermetar ili galvanometar, onda krugom stalno teče električna struja

MJERENJE EMS TERMOČLANKA KOMPENZACIJOM

1
9



Termočlanak se u svrhu mjerenja temperature u procesu mora pomoću posebnih vodiča, nazivaju se kompenzacijski kablovi, spajati s instrumentom i/ili A/D pretvornikom za prijenos signala do elektroničkog računala. Kompenzacijski kablovi prilagođeni su izboru vodiča termočlanka, i u svrhu postizanja maksimalne točnosti mjerenja propisani su posebnim standardom.



Prikaz mjernog spoja termočlanka, mjernih kablova, i instrumenta sa **elektroničkom simulacijom** referentne temperature.



uzemljeni



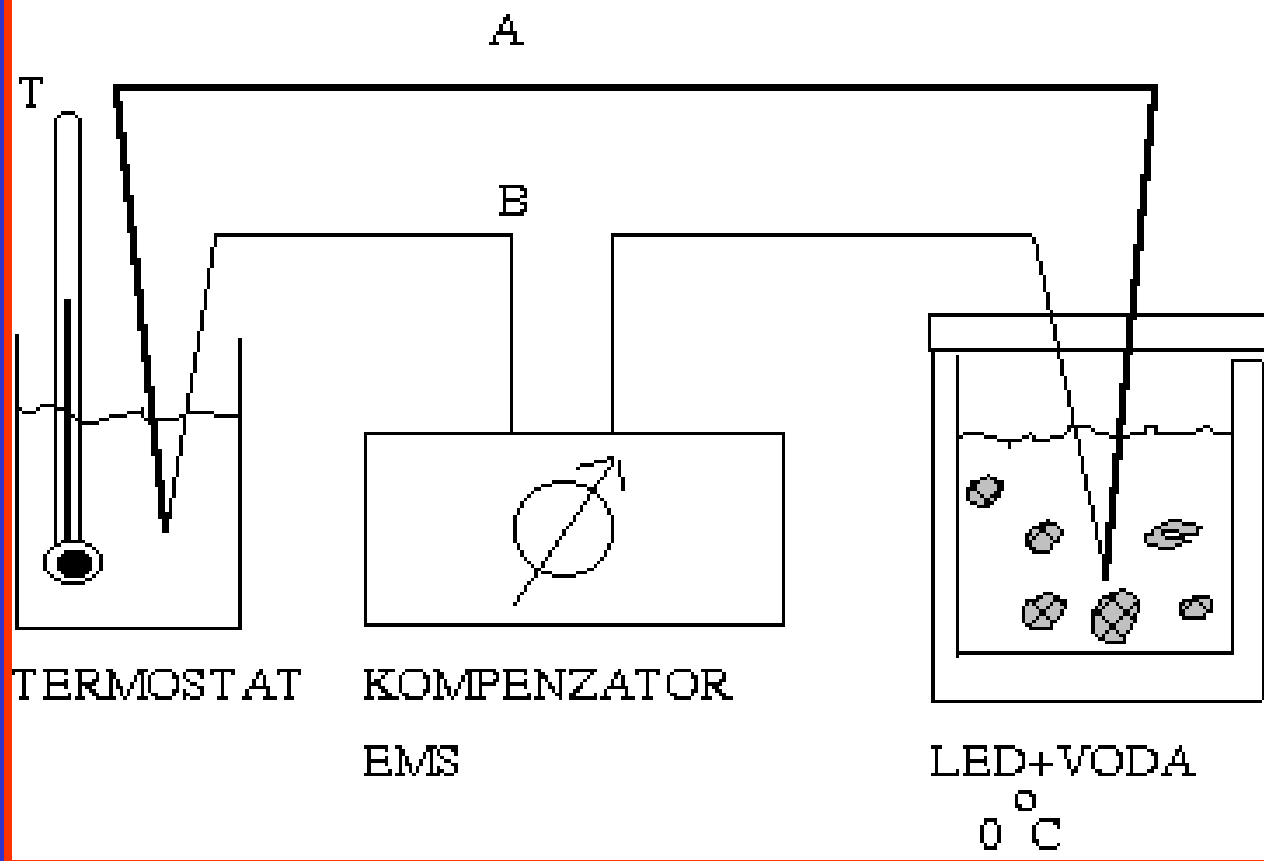
neuzemljeni



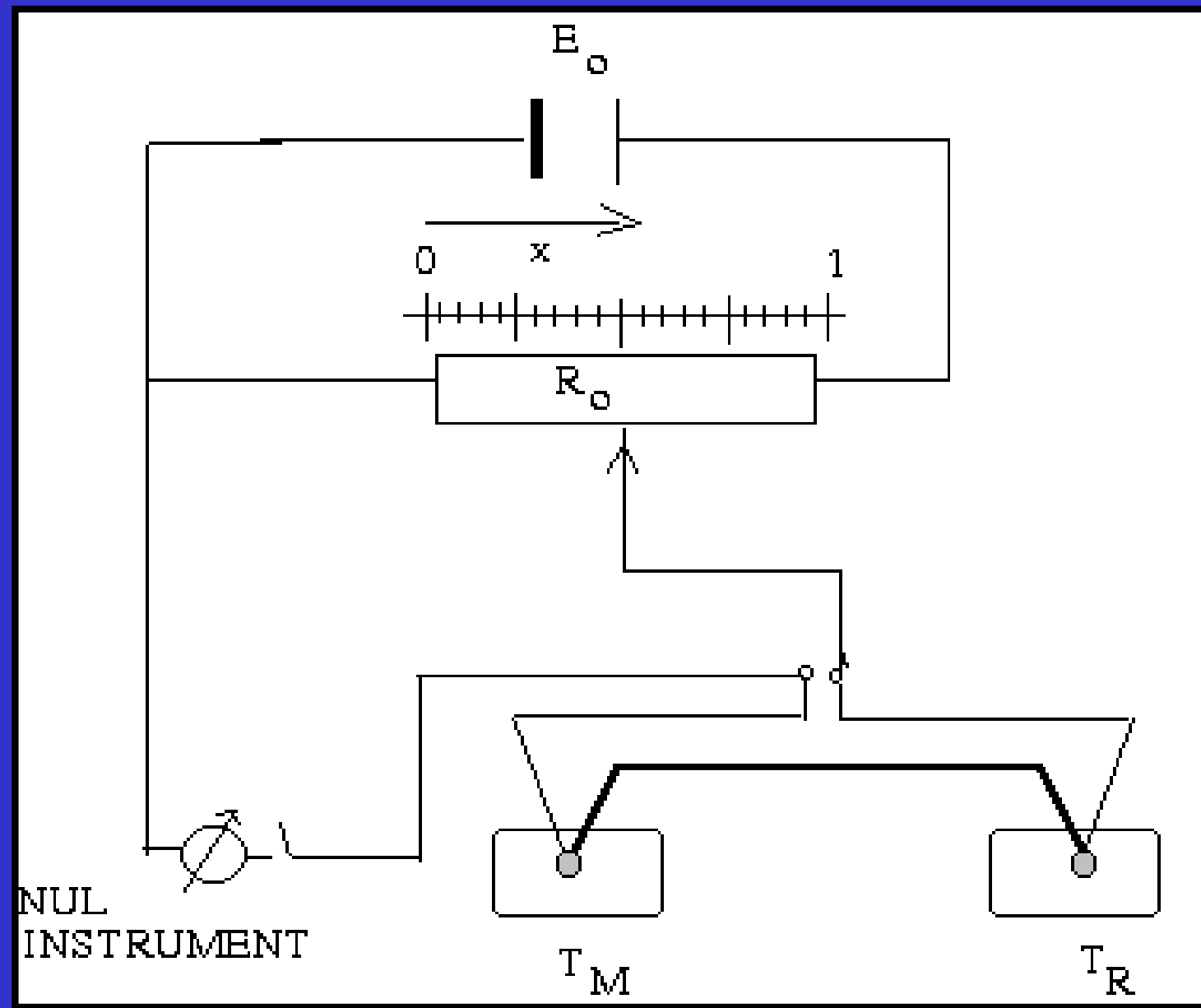
otkriveni

Načini zaštite i uzemljenja mjernog čvorišta termočlanka

Zbog smanjenja, ili potpunog uklanjanja, utjecaja elektromagnetskog polja iz okoline na EMS termočlanka, primjenjuju se različiti načini uzemljenja zaštitnog omotača termočlanka, prikazano na slici.

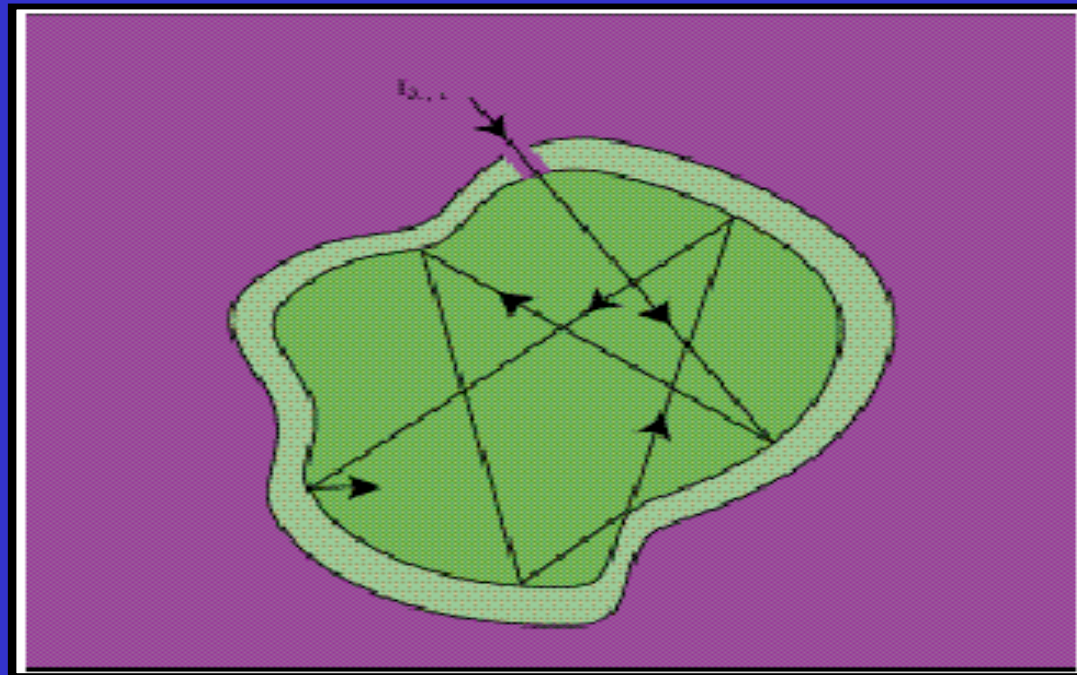


Na slici prikazan je mjerni spoj termočlanka s kompenzacijskim kablovima i instrumentom koji ima elektroničku simulaciju referentne temperature, 0 °C. U tu svrhu rabi unutarnji izvor napona i termistor (temperaturno osjetljivi otpornik) pomoću kojeg se generira EMS referentnog spojišta.



MJERENJE TEMPERATURE ELEKTROMAGNETSKIM ZRAČENJEM

Termometri čiji rad se zasniva na mjerenju intenziteta elektromagnetskog zračenja nazivaju se radijacijski termometri i pirometri. Intenzitet zračenja tijela, krutina, tekućina i plinova, je funkcija temperature, valne dužine i optičkih svojstava površine. U fizici se tijelo koje ima maksimalan intenzitet zračenja i apsorpcije elektromagnetskog zračenja na svakoj temperaturi zove se " crno tijelo ".





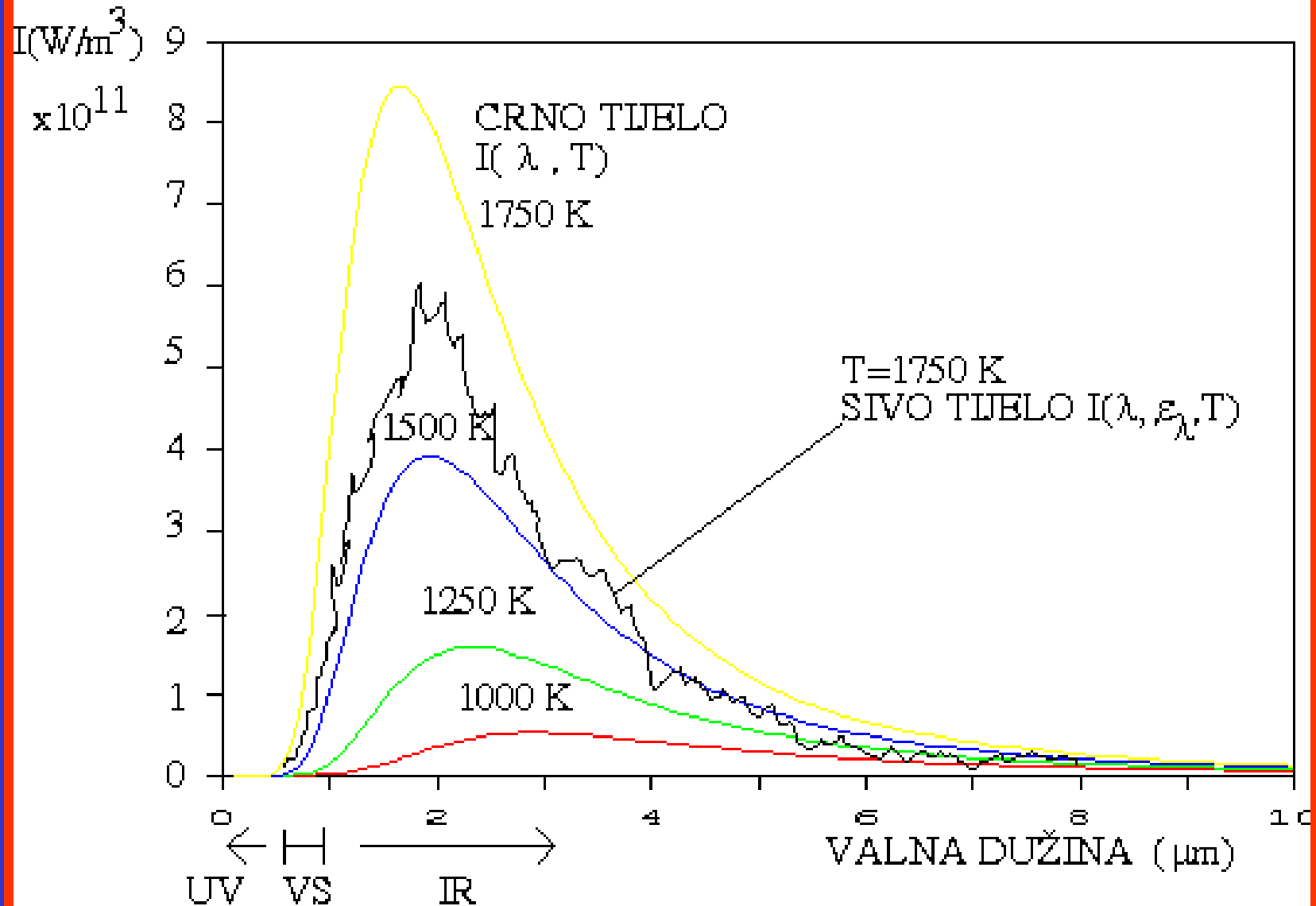
Za crno tijelo je intenzitet zračenja samo funkcija temperature i valne dužine. Teoretski izvod zakona zračenja zasniva se na kvantnoj teoriji energije i poznat je kao Planckov zakon zračenja (1902 g.) . Intenzitet je dan formulom

$$I(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1)^{-1}$$

Prva i druga konstanta Planckovog zakona zračenja, C_1 i C_2 , imaju vrijednosti

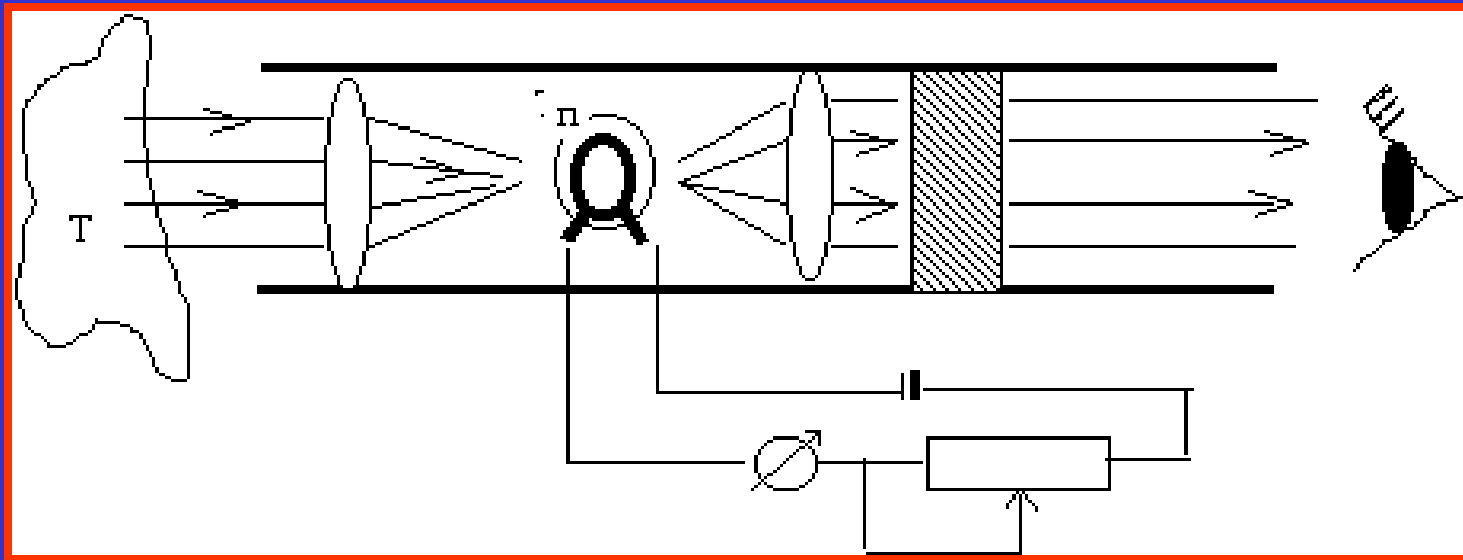
$$C_1 = 8 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 = 1,496 \cdot 10^{-15} \text{ Jm}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$C_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$$

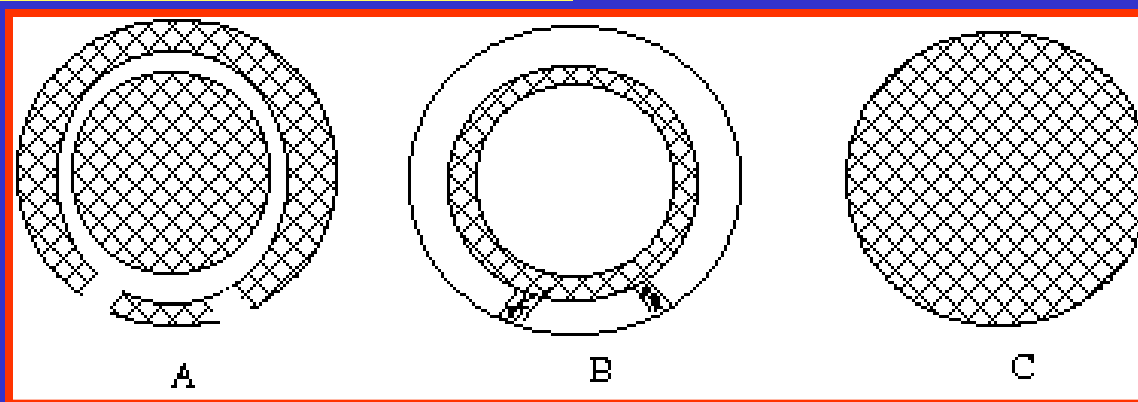


OPTIČKI TERMOMETAR

2
7



Instrument se sastoji od cijevi sa dvije konveksne leće, žarne niti i filtera crvene boje. Žarna nit se zagrijava prolazom električne struje, i sama struja je mjerni signal. Mjerenje se provodi tako da se otvor cijevi instrumenta usmjeri prema površini tijela kojemu se mjeri temperatura. Elektromagnetsko zračenje prolazi kroz okular, prvu leću, i skuplja se u žarištu. U žarištu se nalazi staklena cijev sa žarnom niti. Ta točka je ujedno i žarište druge leće, odnosno okulara. Kroz okular prolazi elektromagnetsko zračenje sa mjenjenog objekta i žarne niti. Iza okulara nastaje paralelan snop zraka koje zatim prolaze kroz filter crvene boje. Filter je nepropustan za sve valne dužine vidljivog spektra osim za dio u području crvene boje, $\lambda=0,65 \mu\text{m}$. Mjeritelj promatra istovremeno sliku površine tijela i žarne niti.

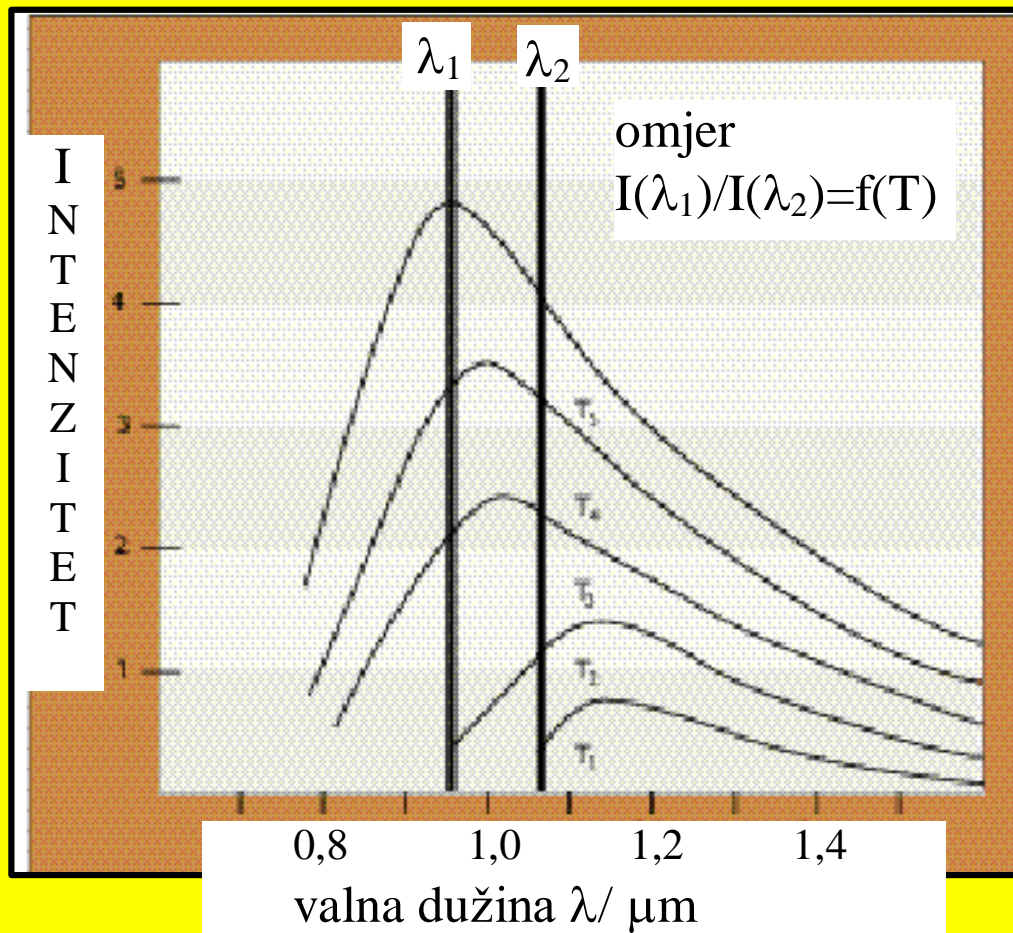


A) $T < T_n$ B) $T > T_n$ C) $T \cong T_n$

Sa T je označena temperatura mjerenog objekta a T_n je temperatura niti u žarištu instrumenta. Mjerni signal T_n se očitava sa instrumenta kada se izjednači sjaj površine objekta i referentne niti instrumenta. U tom slučaju je intenzitet zračenja na valnoj dužini crvene boje jednak za valnu dužinu λ_o

$$I(\lambda_o, T_n) = \varepsilon(\lambda_o) \cdot I(\lambda_o, T)$$

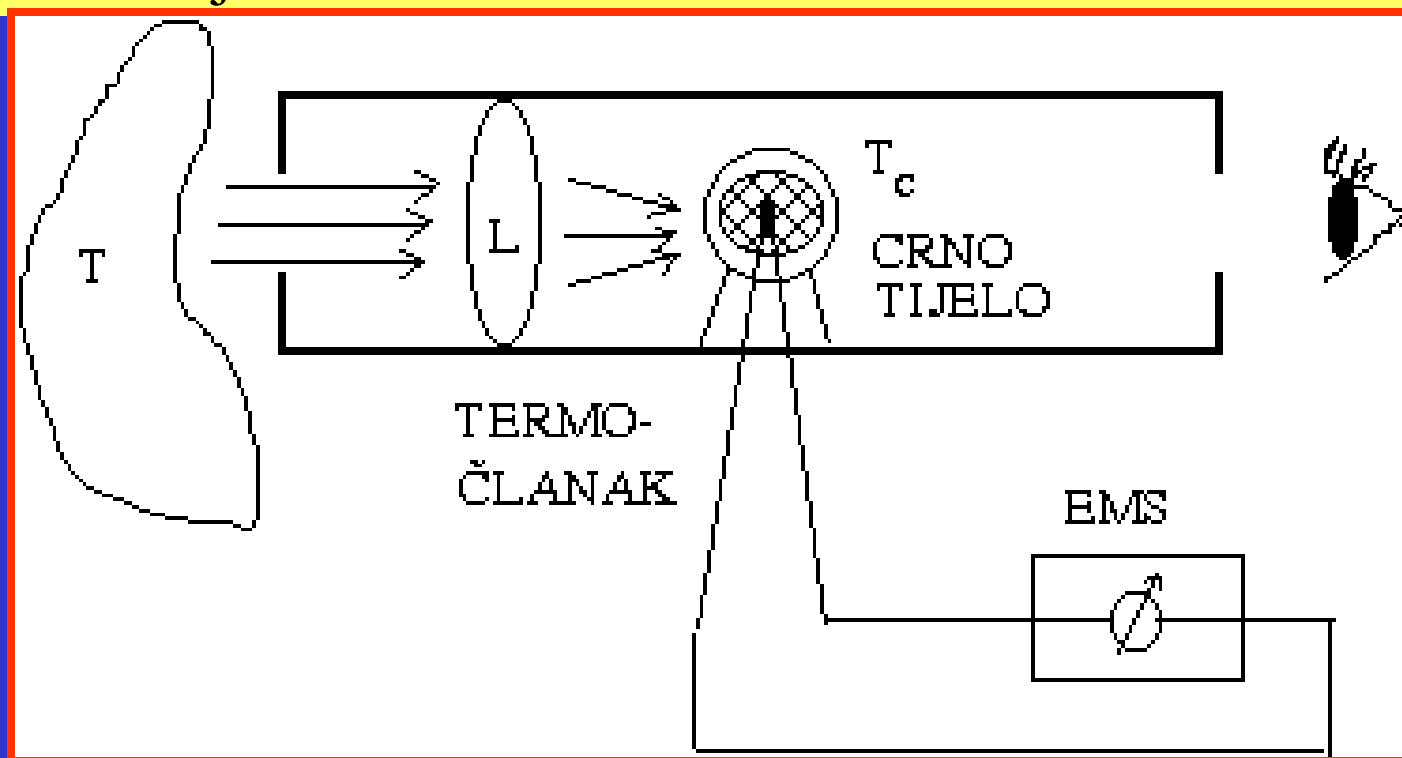
Faktor emisije referentne ima vrijednost 1, ali za mjereni objekt treba uzeti vrijednost monokromatskog faktora emisije. U gornji izraz uvrstimo Planckove formule



Kompensacija faktora emisije provodi se tako da se kao mjerni signal Y uzima omjer intenziteta zračenja

$$Y = \frac{\varepsilon(\lambda_1) \cdot I(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2) \cdot I(\lambda_2, T)}$$

Radijacijskim termometrom određuje se temperatura mjerenjem ukupnog intenziteta elektromagnetskog zračenja, odnosno isijana snaga u cijelom spektru. Stephan-Boltzmanov zakon omogućava jednostavno izračunavanje isijane snage $I(T)$ za "crno tijelo", ali kada se radi o mjerenju temperature realnih tijela nije moguće teoretski proračunati ukupni faktor emisije ε .





Uvjet ravnoteže može se izraziti Stephan-Boltzmanovim zakonom

1

apsorbirana snaga

$$I_A = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

isijana snaga sa pločice

$$I_I = \sigma \cdot T_C^4$$

Izjednačimo li $I_A = I_I$ možemo izraziti temperaturu objekta kao funkciju temperature pločice

$$T = \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \cdot T_C$$

Točnost mjerenja radijacijskim termometrom je određena pouzdanošću poznavanja vrijednosti faktora emisije ε . Najčešće se ε određuje baždarenjem za pojedine materijale i uvjete mjerenja.





Prikaz umjeravanja radijacijskog termometra s "vrućom pločom crnog tijela"

stacionaran termometar

objekt

315°C

mjerna
točka

mjerjenje temperature u točki

$T(x)$
boje

prikaz trake

"scan" termometar

točka A

točka B

pokretna
traka

mjerni
snop

linijski "scan" temperature

