

4. TEMPERATURNI SENZORI

- Mjerenje i regulacija temperature je najčešći oblik u regulaciji nekoga procesa
- Za kvalitetno mjerjenje temperature potrebno je definirati temperaturnu skalu
- Najčešće temperaturne skale su Celzijeva i Farenheitova ($^{\circ}\text{C}$ i $^{\circ}\text{F}$)
- Za razliku od navedenih relativnih temperaturnih skala u tehnici se koristi SI absolutna temperaturna ljestvica u stupnjevima Kelvina
- LEDIŠTE: 32°F 0°C
- VRELIŠTE 212°F 100°C
- Konverzija: $0 \text{ K} = -273,16^{\circ}\text{C}$, $\text{F} = 9/5\text{C} + 32$, $\text{C} = 5/9(\text{F} - 32)$
- U industrijskim primjenama temperatura izražena u $^{\circ}\text{C}$ široko je rasprostranjena, ali je konverzija u Kelvinove stupnjeve potrebna pri različitim termodinamičkim proračunima kao npr. proračun plinskih volumena ili tlakova

OSNOVE TEMPERATURNIH MJERENJA

- Postoje 4 vrste temperaturnih senzora koji se temelje na fizikalnim svojstvima o kojima ovisi temperatura:

- *ekspanzija određenog fluida ili tvari ovisno o temperaturi, koja uzrokuje promjenu u duljini, volumenu ili tlaku (živini ili alkoholni termometri)*

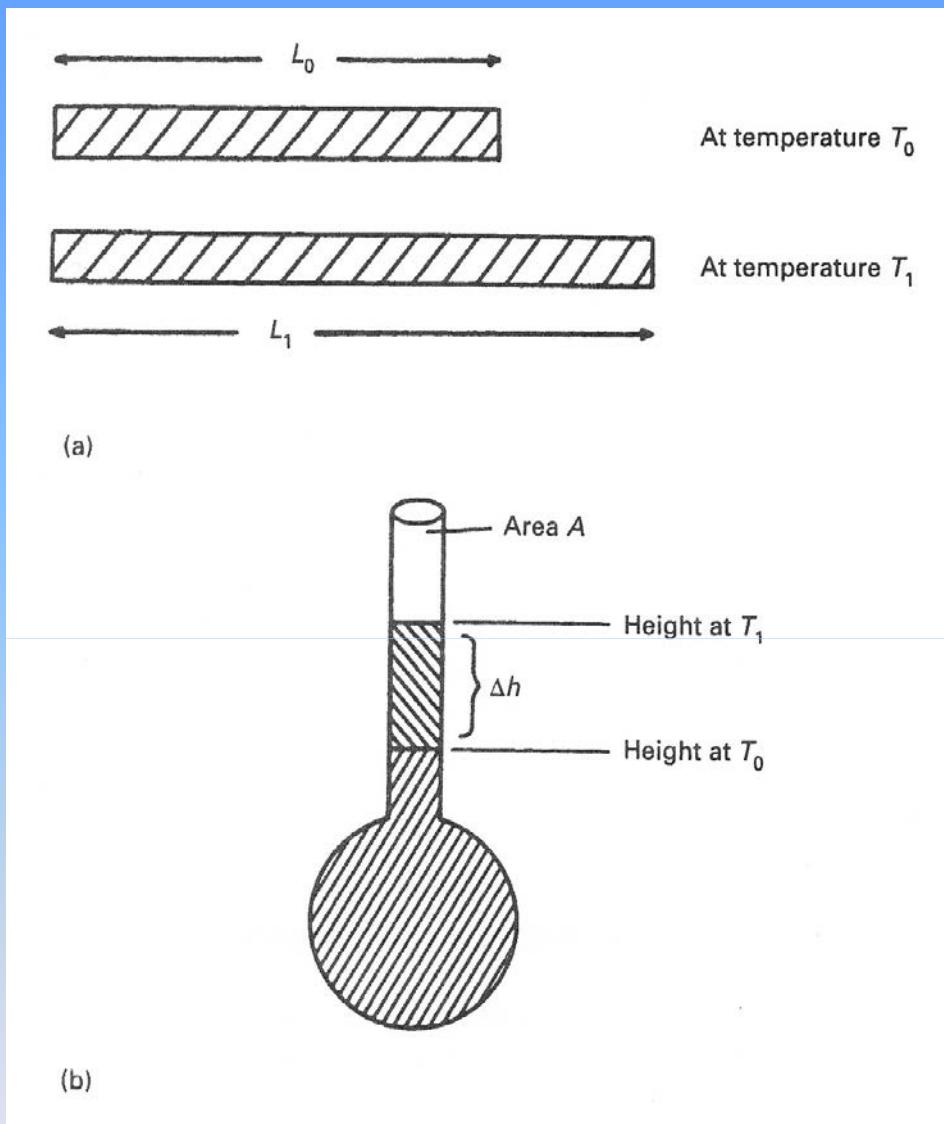
- *promjena u električnom otporu s promjenom temperature (otporni termometri i termistori)*

- *promjene u kontaktном potencijalu između različitih metala (termoparovi)*

- *promjene u energiji zračenja (optički i radijacijski pirometri)*

- Ekspanzijski termometri

- Ako se zagriju s temperature T_0 na višu temperaturu T_1 , metal će se produžiti na duljinu L_1 , a fluid će ekspandirati do volumena V_1



Slika 30.: Ekspanzija metala i fluida s promjenom temperature

- Nova dužina data je jednadžbom:

$$L_1 = L_0(1 + \gamma(T_1 - T_0))$$

- γ je definirana kao koeficijent linearne toplinske ekspanzije

- Tipične vrijednosti γ su:

čelik: $6,7 \cdot 10^{-6}$

bakar: $16,6 \cdot 10^{-6}$

aluminij: $25 \cdot 10^{-6}$

- Novi volumen na slici 30b). dat je:

$$V_1 = V_0(1 + \alpha(T_1 - T_0))$$

- α je koeficijent volumne toplinske ekspanzije

Tipične vrijednosti α su:

živa: $0,56 \cdot 10^{-4}$

alkohol: $0,35 \cdot 10^{-4}$

- Na slici 30b). porast volumena ΔV manifestira se kao promjena Δh u visini stupca tekućine u cijevi

- Ako je A površina presjeka tada jednadžba glasi:

$$\Delta h = \Delta V/A$$

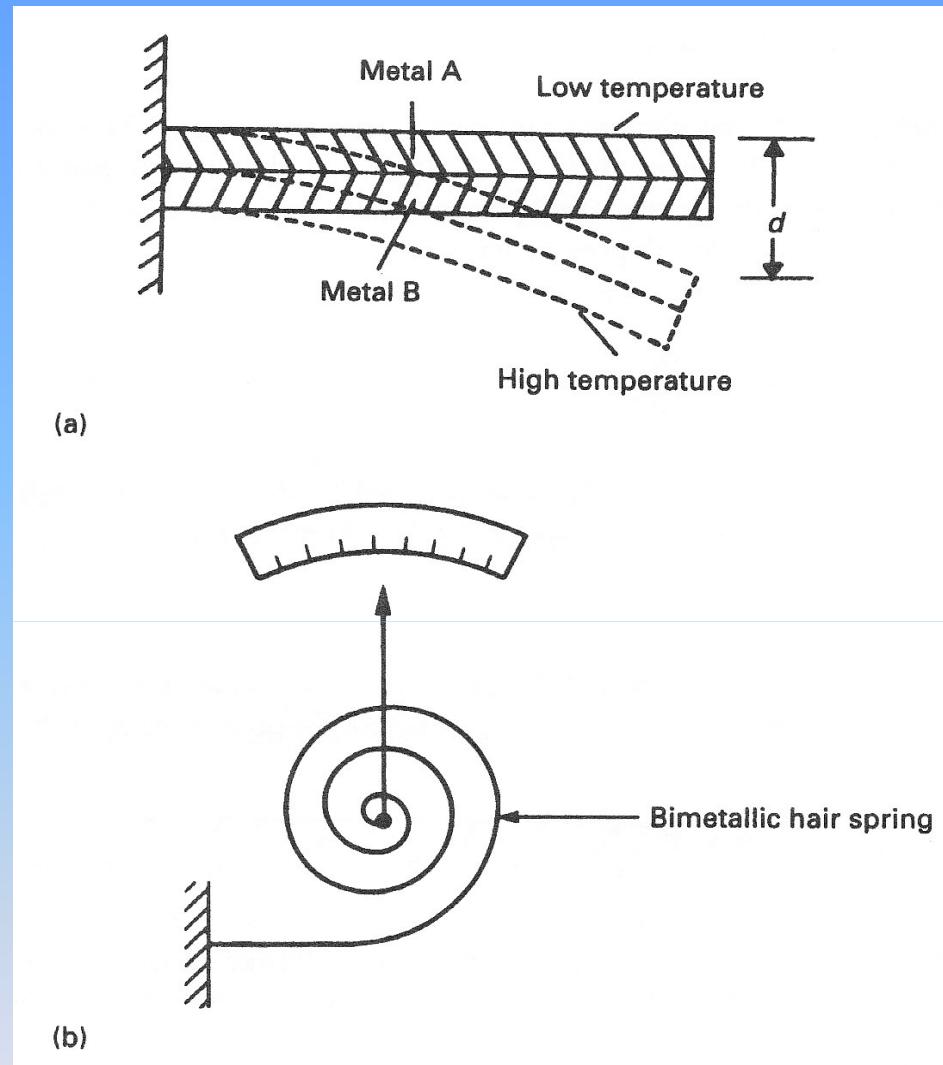
- Ako je površina A jako mala ovakvi termometri mogu mjeriti i jako male promjene u temperaturi

- Na ovome temelju radi svi živini termometri

- *Bimetalni termometri*: rade na osnovama dva spojena metala različitih koeficijenata toplinske ekspanzije

- Porastom temperature metal višeg koeficijenta toplinske ekspanzije izaziva savijanje toplinske poluge, te se javlja defleksija d koja je u funkciji temperature

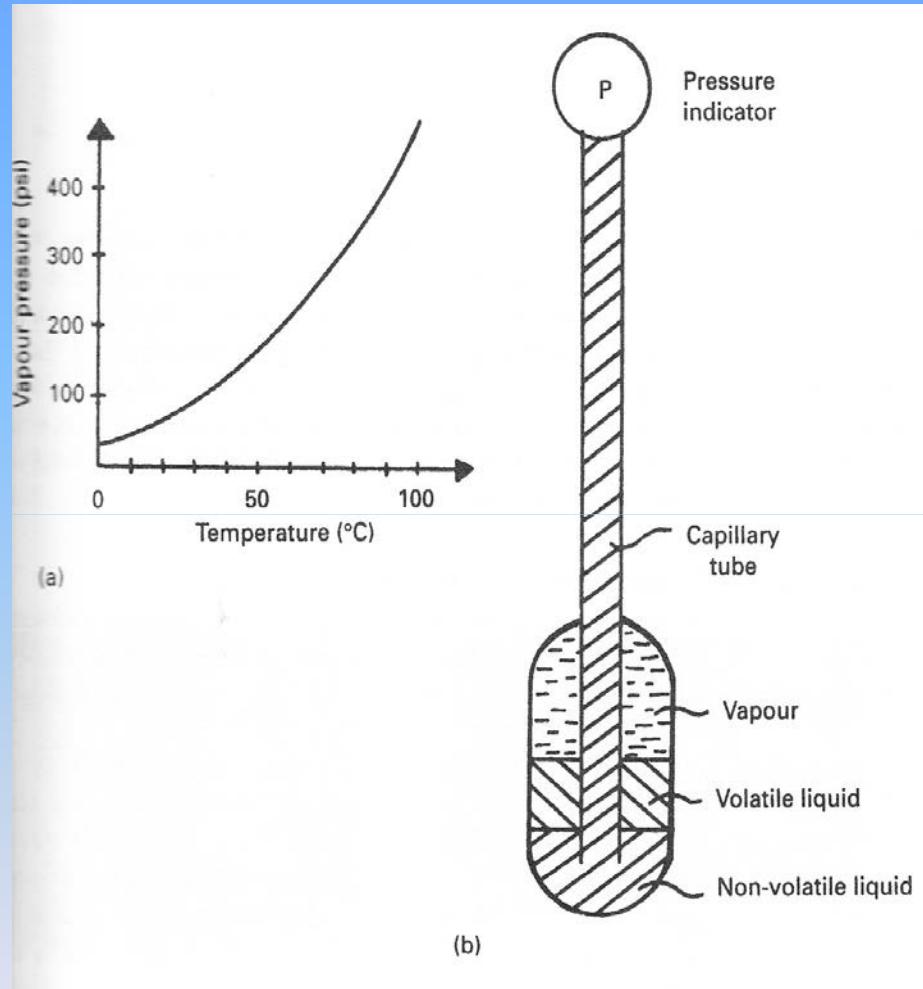
- Defleksija d je jako mala ali se njena vrijednost može povećati upotrebom bimetalne opruge kao na slici 31b).



*Slika 31.: Bimetalični termometri: a) bimetalična poluga
b) bimetalična opruga*

- Bimetalični termometri su prilično jeftini ali i dosta neprecizni
- Ne koriste se često u industriji jer ne mogu osigurati daljinsko davanje signala
- Temperaturno osjetni prekidači (*termostati*) se često temelje na osnovi kao na slici 31b).
- Razlika je ta što se umjesto strijelice za pokazivanje koriste prekidni kontakti (*switch contacts*)

- Termometri s tlakom pare:



- Isparljiva tekućina (*volatile liquid*) nalazi se u donjem dijelu termometra i blokirana je s neisparljivom tekućinom koja ujedno ispunjava kapilarne cijevi do indikatora tlaka
- Tlak pare je povezan izravno s indikatorom tlaka te volumen i temperatura kapilarne cijevi nema nikakvih utjecaja
- Granica udaljenosti donjeg dijela termometra od indikatora tlaka je do 100m (limitirana brzinom reakcije do 20 s)
- Pošto nemaju nikakvih električnih dijelova pogodni su za prostorije s eksplozivnom atmosferom (*hazardous areas*)

Slika 32.: Termometri s tlakom pare: a) krivulja tlaka pare za metil-klorid, b) termometar

- Otporni termometri

- Električni otpor većine metala raste otprilike linerano s porastom temperature
- Ako metalna žica ima temperaturu R_0 pri 0°C , električni otpor pri temperaturi T je:

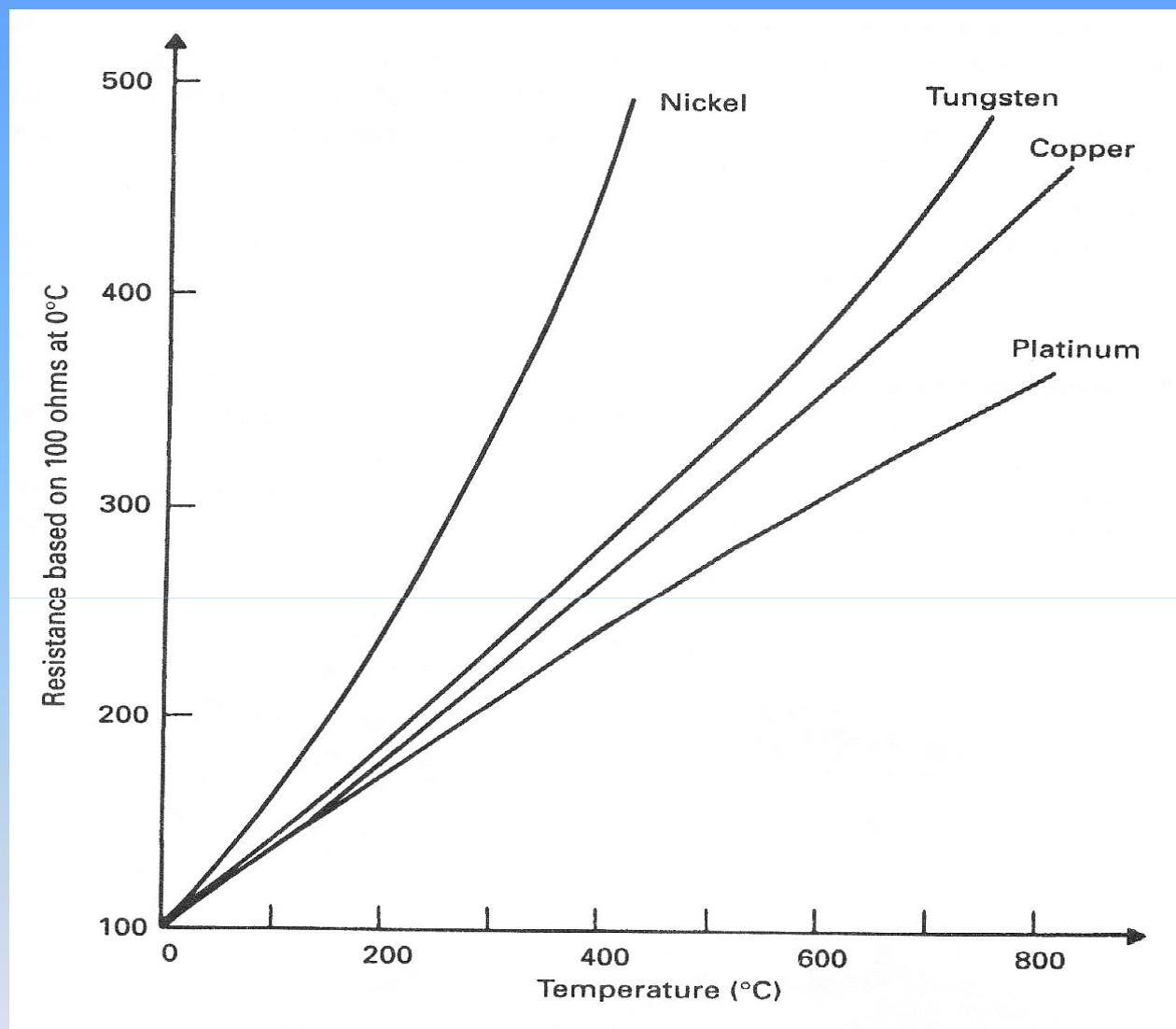
$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots)$$

- Za većinu industrijskih primjena članovi jednadžbe s kvadratnom potencijom i više se mogu zanemariti te vrijedi jednadžba:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T)$$

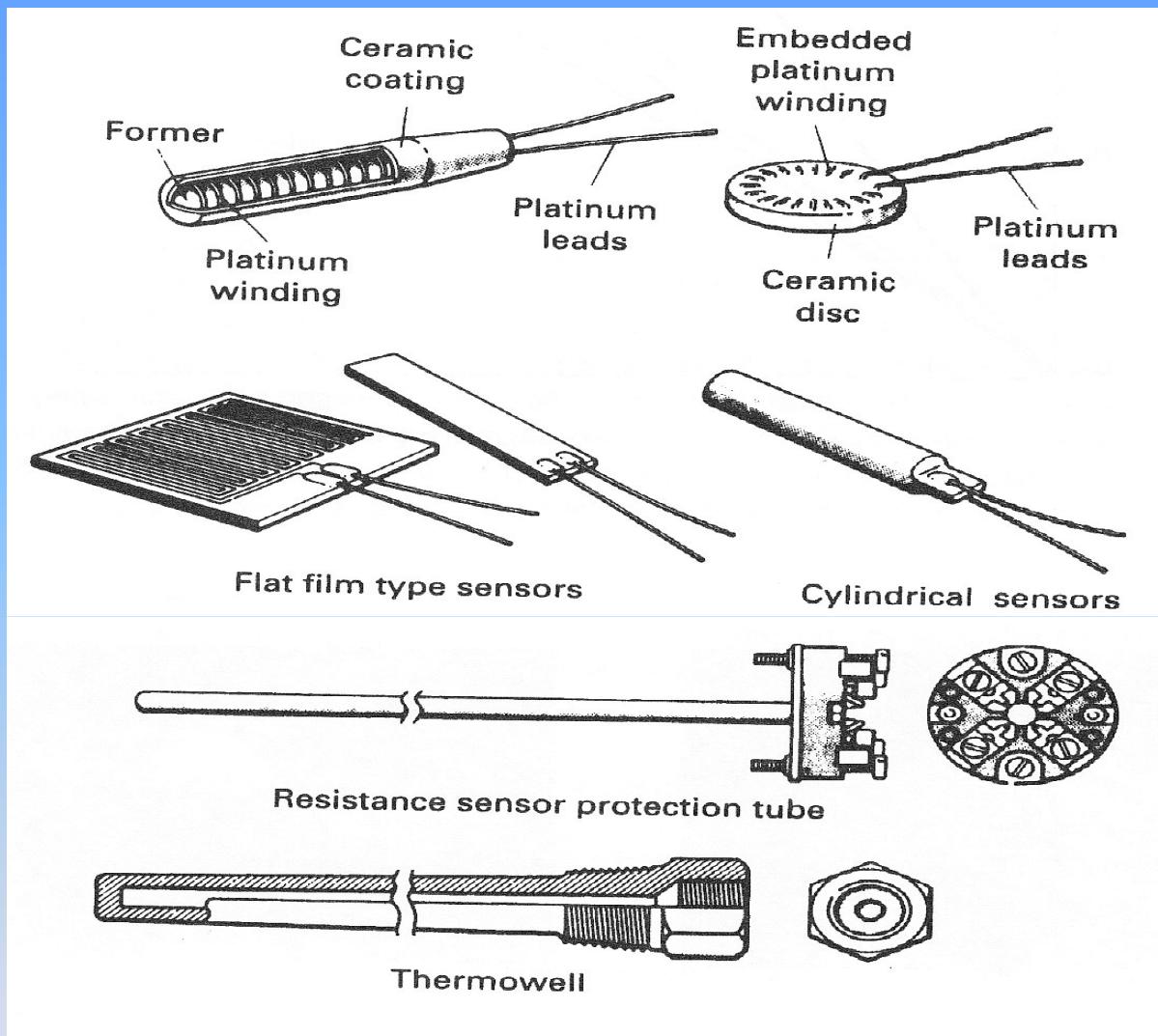
- Gornja jednadžba vrijedi za raspon temperatura: $0 < T < 150^\circ\text{C}$
- Gdje se konstanta α zove temperaturni koeficijent električnog otpora
- Vrijednosti α su:

METAL	α
platina	0,0039
bakar	0,0043
nikal	0,0068



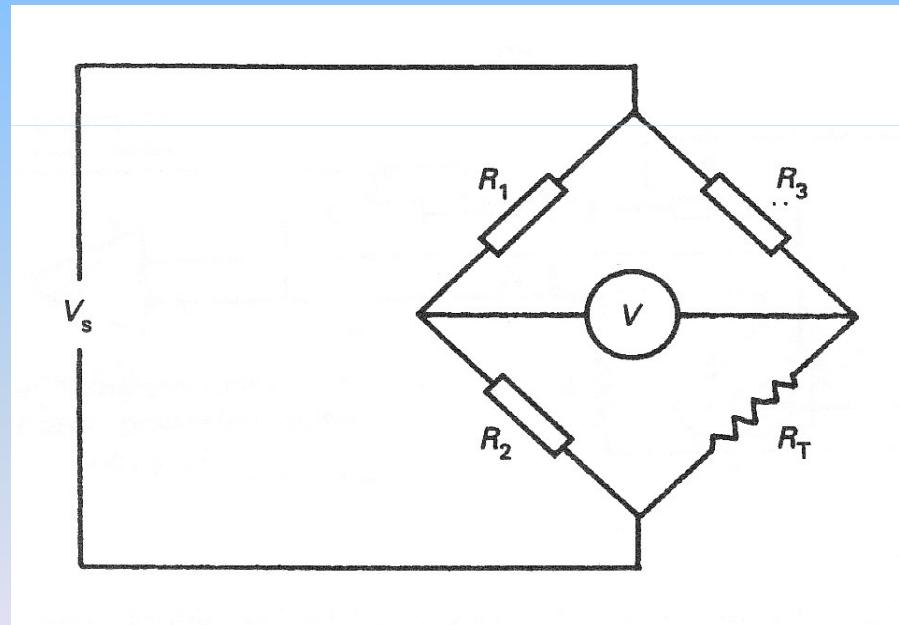
Slika 33.: Promjena otpora s promjenom temperature za različite metale

- Temperaturni senzori temeljeni na osnovama promjene električnog otpora zovu se otporni temperaturni senzori (*resistance temperature detectors - RTD*)
- Njihova specifikacija je data za otpor pri temperaturi od 0°C i za promjenu otpora u intervalima od 100°C
- Interval od 0°C do 100°C naziva se temeljni(fundamentalni) interval
- RTD od platine projektirani su s otporom od 100 ohma pri 0°C
- Ovakvi senzori mogu se koristiti za temperaturne domete od -200°C do 800°C s točnošću od $\pm 0,5\%$ u intervalu od 0°C do 100°C , te s točnošću od $\pm 3\%$ na ekstremnim temperaturnim dometima
- RTD su dostupni u različitim oblicima i prikazani su na slici 34. te su projektirani da štite metalnu žicu od mehaničkih oštećenja ali bez izazivanja dodatnih naprezanja metala
- Iako direktni kontakt metalne žice i fluida koji se mjeri ima najbolji efekt i najbrži odgovor, to se izbjegava zbog korozivnih oštećenja metalnih žica



Slika 34.: Otporni termometri od platine - različite konstrukcije

- Prije upotrebe signala s RTD senzora, signal se mora pretvoriti u električni napon ili jakost struje
- Električna struja koja se rasipa u RTD senzorima mora biti stroga limitirana da se izbjegnu greške zbog samog električnog zagrijavanja senzora (I^2R)
- Najčešći električni krug koji se koristi prikazan je na slici 35. i zove se Wheatstoneov most

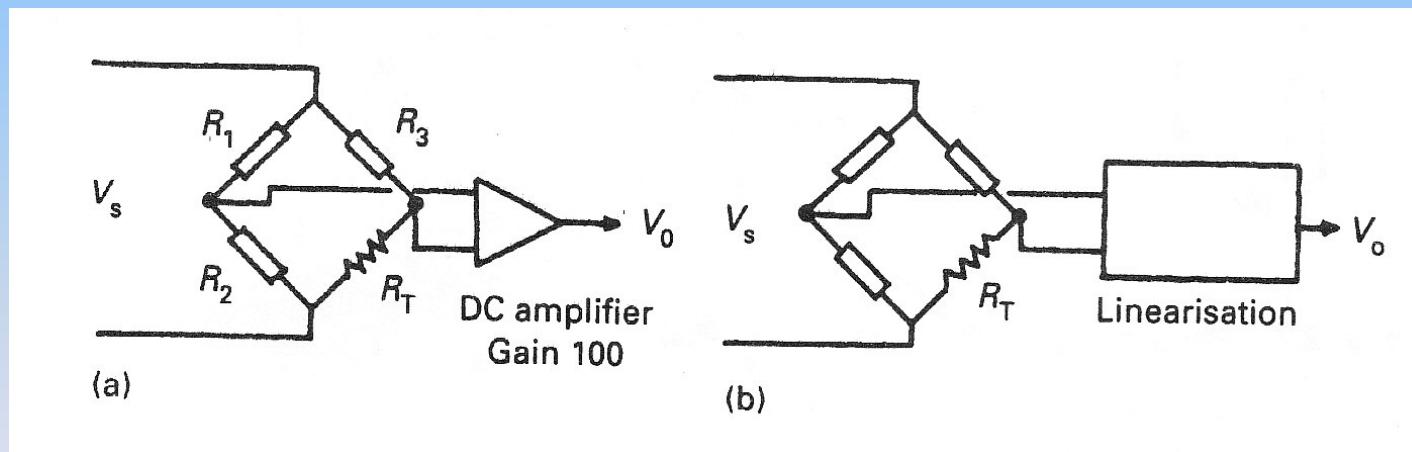


Slika 35.: Wheatstonov most

- Ako u mjernom krugu Wheatstonovog mosta postoji visoka impedancija tj. oba dijela mosta nisu podjednako pod naponom, jednadžba strujnog kruga glasi:

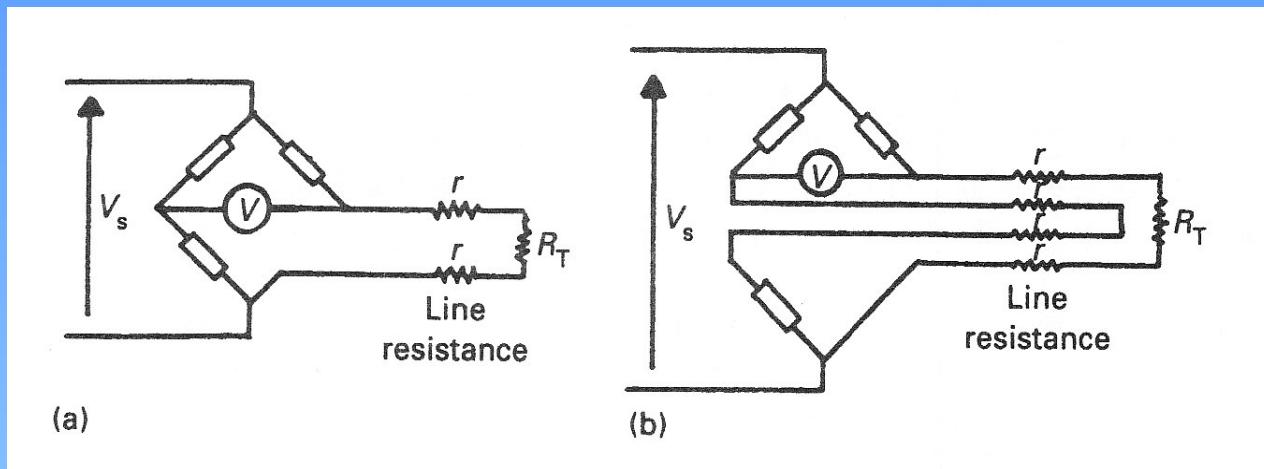
$$V = V_s \left(\frac{R_T}{R_T + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

- Pošto se član R_T pojavljuje i u brojniku i u nazivniku lijeve strane jednadžbe mjerena vrijednost V ne mjenja se linearno s promjenama otpora R_T
- Postoji nekoliko načina da se prevlada ta nelinearnost, kao što je prikazano na slici 36.:

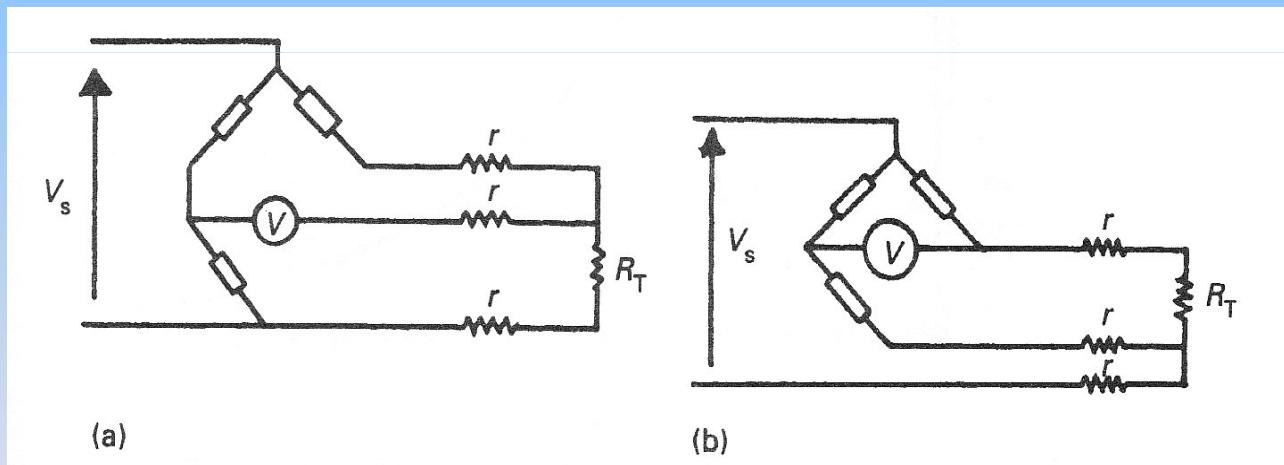


Slika 36.: Metode prevladavanja nelinearnosti izlaznog signala

- Nelinearnost se može reducirati na prihvatljivu razinu na način da se povećaju otpori R_3 i R_1 i to 100 puta ($R_3 \gg R_p, R_1 \gg R_2$)
- Ovo ima popratni efekt u smanjivanju napona mosta 100 puta, ali to se može riješiti s istosmjernim pojačalom koje će izlazni signal pojačati 100 puta (slika 36 a.)
- Nelinearnost se može riješiti i uključivanjem prikladnog kruga linearizacije koji će davati izlazni napon linearan s mjerom temperaturom
- Ovdje se linearizacije postiže mikroprocesorskim instrumentima (slika 36 b.)
- U mnogim postrojenjima RTD se smješteni na udaljenosti od mjerne elektronike(pretvornika)
- Ta udaljenost, ako je dulja od nekoliko metara, izaziva nepoznati otpor r u strujnim vodovima, koji može dalje izazivati pogrešku u očitanim ulaznim signalima
- To se može riješiti povezivanjem s četri kabela kako je prikazano na slici 37.
- U svakom kabelu se izaziva jednaki otpor, pa se svi otpori anuliraju i mjeri se otpor izazvan samo promjenom otpora u RTD-u



Slika 37.: Utjecaj otpora u kabelima na RTD, a) dvokabelna veza, b) četverokabelna veza

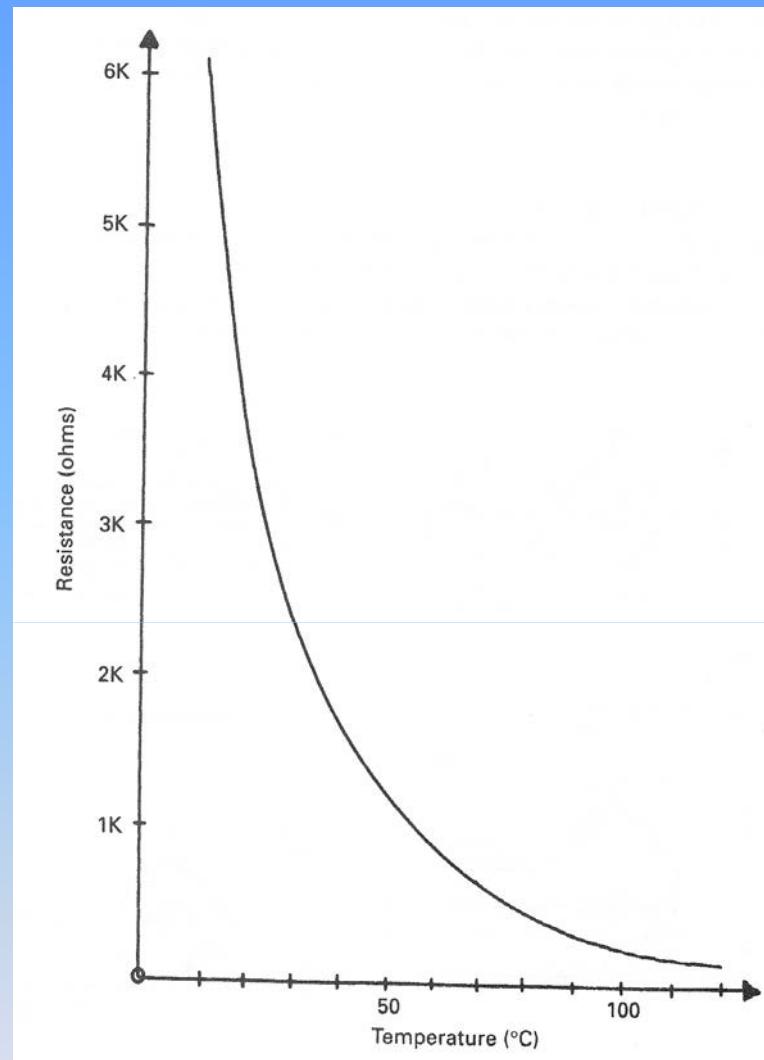


Slika 38.: Trokabelna veza uobičajena u industrijskim uređajima

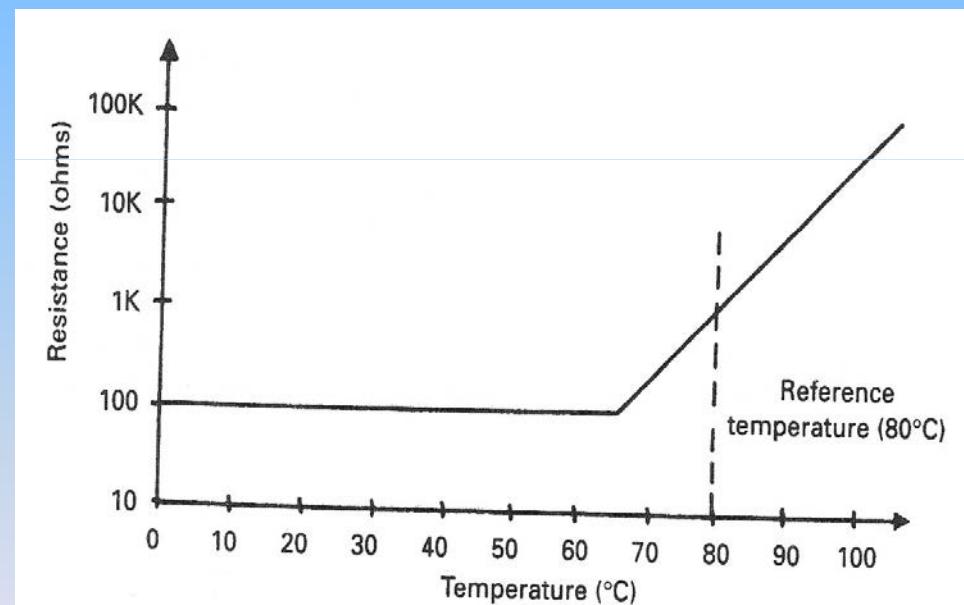
- Termistori

- RTD uređaji ostvaruju manji , ali linearan porast električnog otpora metala s porastom temperature
- Poluvodiči ostvaruju veliki, iako izrazito nelinearan, pad električnog otpora s porastom temperature
- Temperaturni senzori temeljeni na poluvodičima zovu se termistori
- Otpor termistora varira, te opada s porastom temperature (od 10 kohm pri 0°C do 200 ohm kod 100°C)

- Termistori dolaze u različitim oblicima i veličinama, te su uobičajeno manji od otpornih termometara i imaju znatno brži odgovor
- Osjetljivost termistora čini ih prikladnima za električne krugove toplinskih alarma
- Osim termistora s negativnim temperaturnim koeficijentom moguće je proizvesti i termistore s pozitivnim temperaturnim koeficijentom (gdje otpor raste s porastom temperature)
- Takvi su termistori pogodni za sustave alarma a ne za mjerjenje temperatura



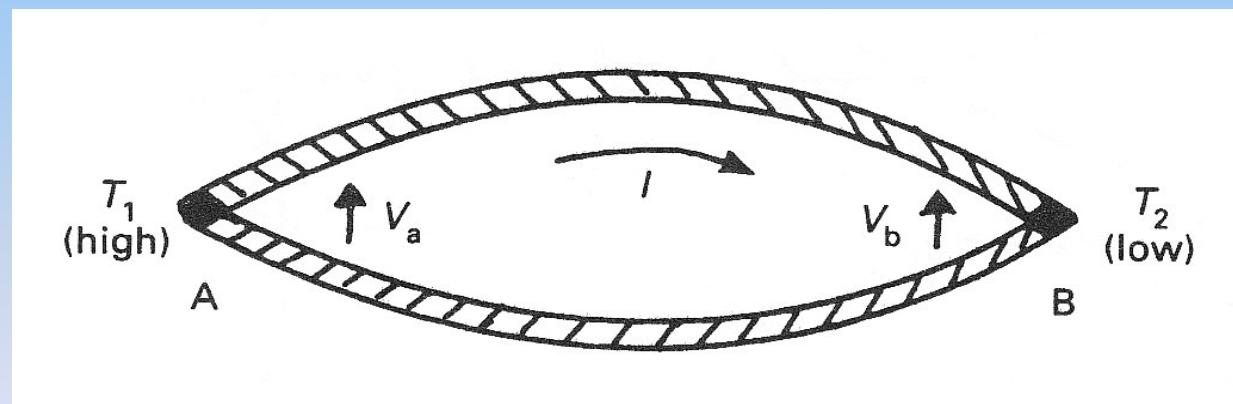
Slika 39.: Krivulja otpora i temperature negativnog termistora



Slika 40.: Promjena u otporu kod pozitivnog termistora

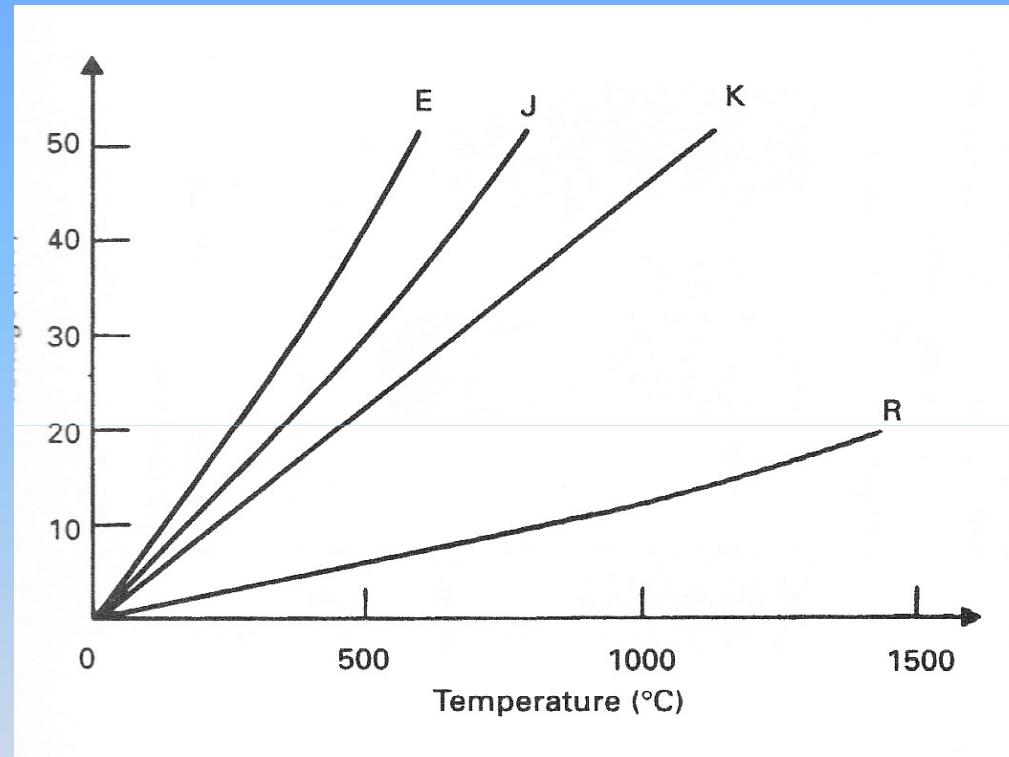
- Termoparovi (thermocouples)
- Djeluju na osnovi termoelektriciteta tj. termoelektričnog efekta (*Seebeckov efekt*)
- Kada su dva različita metala spojena na krajevima s dva spoja te kada se jedan kraj grije na temperaturu T_1 , a drugi se drži na nižoj temperaturi T_2 , struja će poteći tim krugom
- Napon struje ovisi o vrstama metala i temperaturama T_1 i T_2
- Uređaji koji koriste ovaj efekt zovu se termoparovi
- Efekt se zbiva zbog porasta električnog potencijala na spojevima dvaju različitih metala

- Potencijali ovise o temperaturi metalnih spojeva i javljaju se zbog različitih električnih i toplinskih svojstava različitih metala
- Pojednostavljeni, elektroni na višoj temperaturi T_1 imaju više toplinske energije od onih na nižoj temperaturi T_2 , te se zbiva tok elektrona od T_1 prema T_2 , što izaziva električni napon (električni potencijal je vrlo malen, pa je i napon jako malen – desetinke milivolta)
- U slučaju da su temperature jednake tj. ako je $T_1 = T_2$ nema napona struje u termoparovima



Slika 41.: Jednostavni termopar

- Iako se svaki par različitih metala može koristiti za formirati termoparove, tijekom niza godina došlo je do standarda u upotrebi metala za termoparove

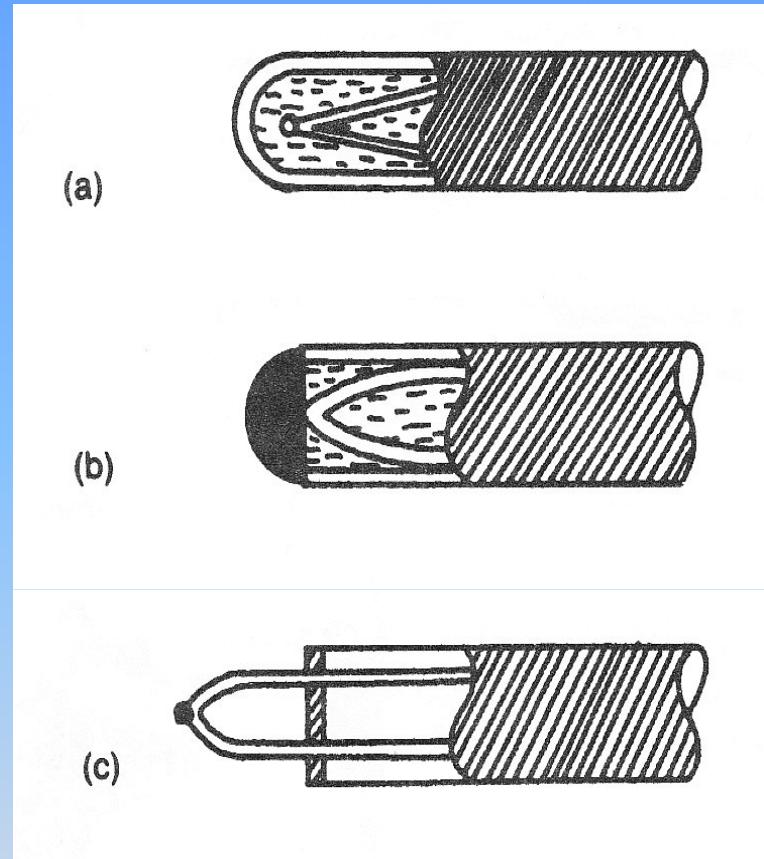


Slika 42.: Osjetljivost različitih vrsta termoparova

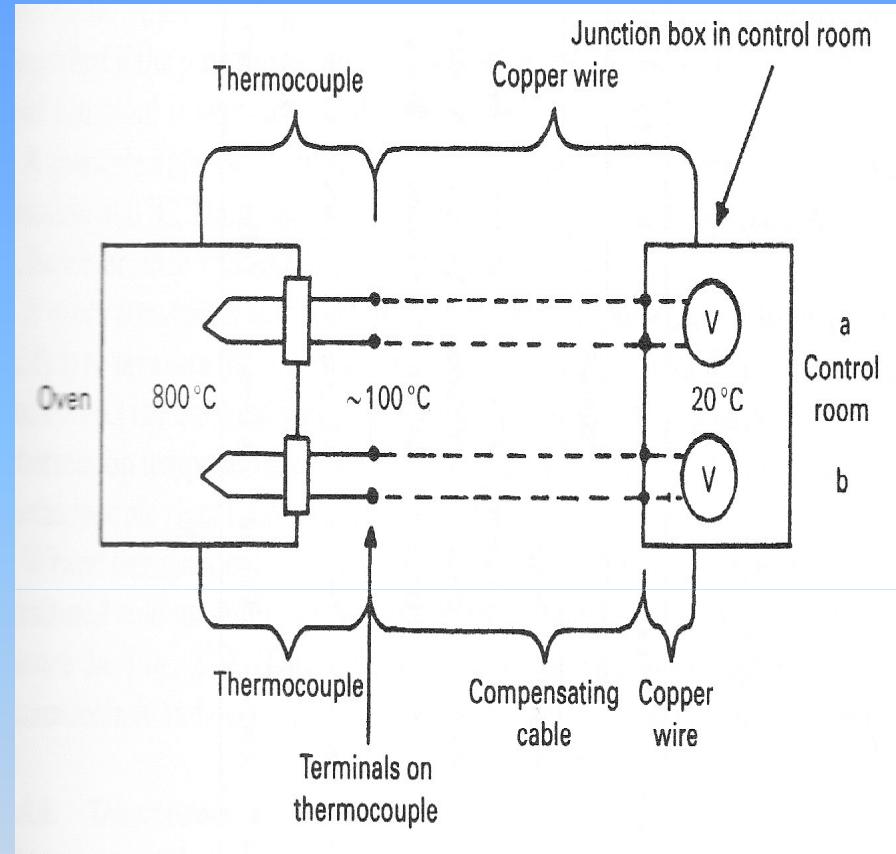
Type	Material +	Material -	$\Delta V/\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $100\text{ }^{\circ}\text{C} (\mu\text{V})$	Usable range ($^{\circ}\text{C}$)	Comments
E	Chromel (90% nickel, 10% chromium)	Constantan (57% copper, 43% nickel)	68	0 to 800	Highest-output thermocouple
T	Copper	Constantan	46	-185 to +300	Used for cryogenics and mildly oxidising or reducing atmospheres (e.g. boiler flues)
K	Chromel	Alumel (94% nickel, 3% manganese, 2% aluminium, 1% silicon)	42	0 to 1100	General purpose, widely used
J	Iron	Constantan	46	20 to 700	Used with reducing atmospheres. Iron tends to rust and oxidise; can be improved with chrome/ nickel/titanium steel
R	Platinum/ 13% rhodium	Platinum	8	0 to 1600	High temperatures (e.g. steel making). Used in UK in preference to type S
S	Platinum/ 10% rhodium	Platinum	8	0 to 1600	As type R, but used outside UK
V	Copper	Copper/nickel	—	—	Compensating cable for type K to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ can also be used for type T
U	Copper	Copper/nickel	—	—	Compensating cable for types R and S to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Slika 43.: Tipovi termoparova

- Često je upotreba termoparova takva da je potrebna složenija instalacija termoparova u sustavu mjerjenja (npr. jedan spoj termopara je na mjestu mjerjenja signala a drugi u kontrolnoj sobi ili kontrolnom mjestu)
- U takvim slučajevima spojevi termoparova (terminali) se povezuju bakrenim žicama koje se još zovu i produžnim kabelima
- Takvo produženje izaziva razliku temperatura na krajevima takvih kabela (što izaziva promjenu napona signala koji je izmjerен mjernim spojem termopara)
- To se može izbjegići ugradnjom tzv. kompenzacijskih kabela umjesto običnih bakrenih žica
- Kompenzacijski kabeli su metali koji odgovaraju metalima termoparova tako da kompenziraju te razlike temperturnih signala koji bi nastali upotrebom običnih produžnih kabela (ne izazivaju promjenu napona signala u kabelima)
- Mjerni spoj termopara može biti različito izведен ovisno o mjernom mjestu termopara (mjerni spojevi mogu biti potpuno izolirani ili potpuno izloženi)

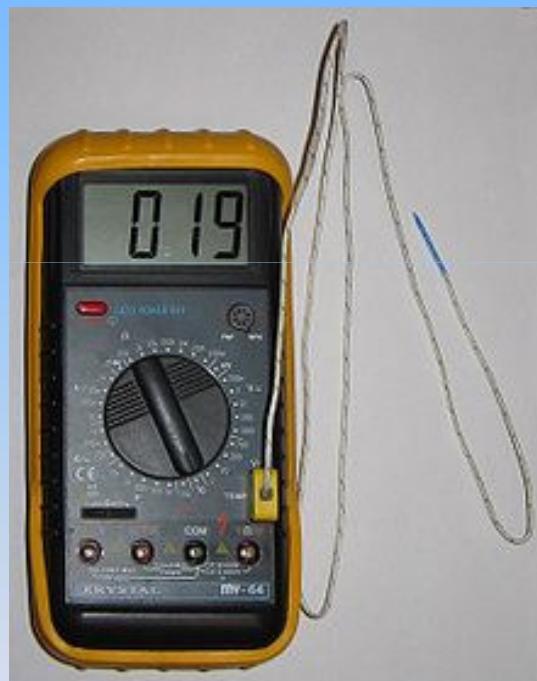


*Slika 44.: Izvedbe mjernih spojeva termoparova:
a) izoliran, b) neizoliran, c) izložen*



Slika 45.: Upotreba kompenzacijskih kabela

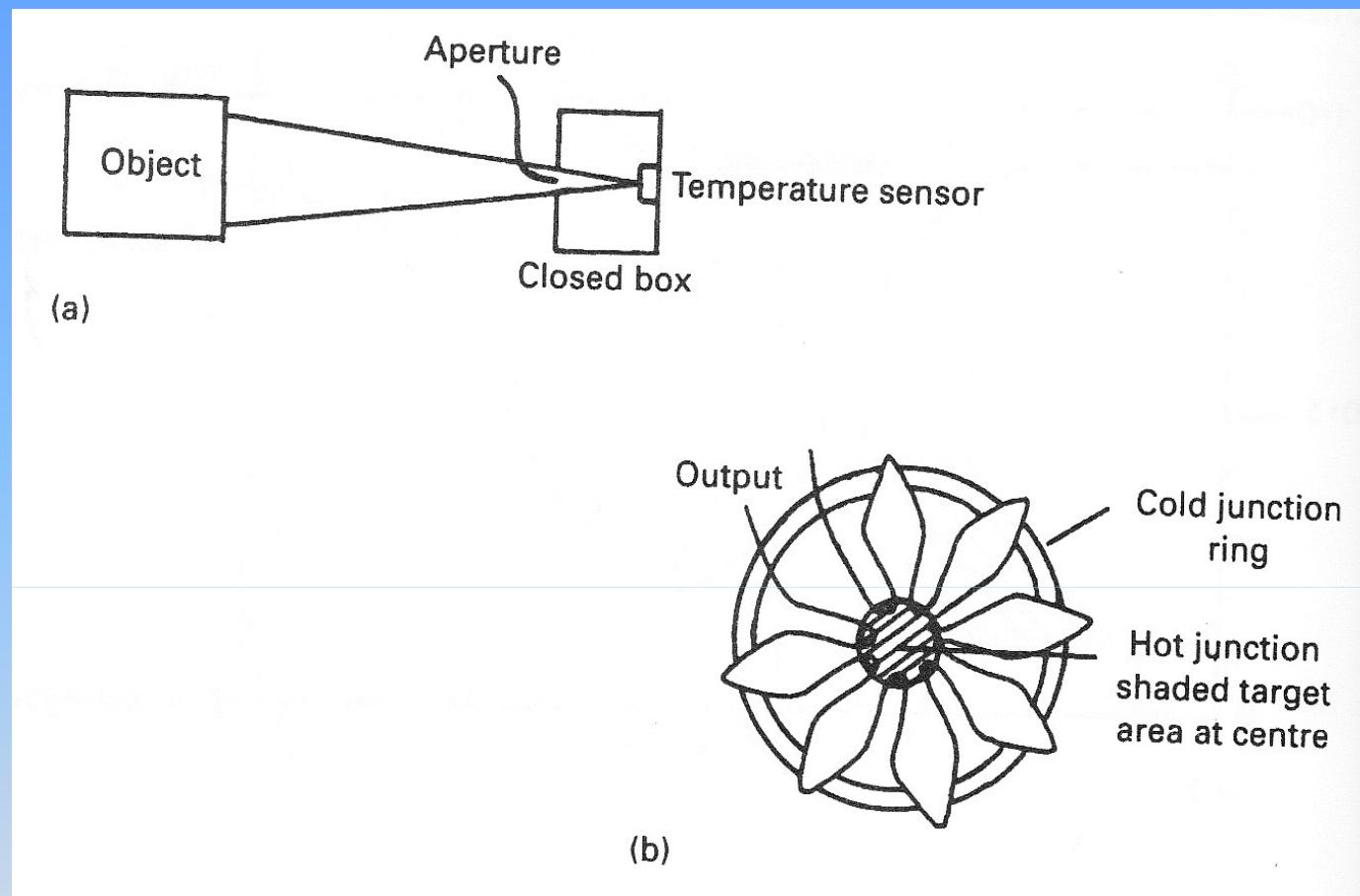
German DIN:



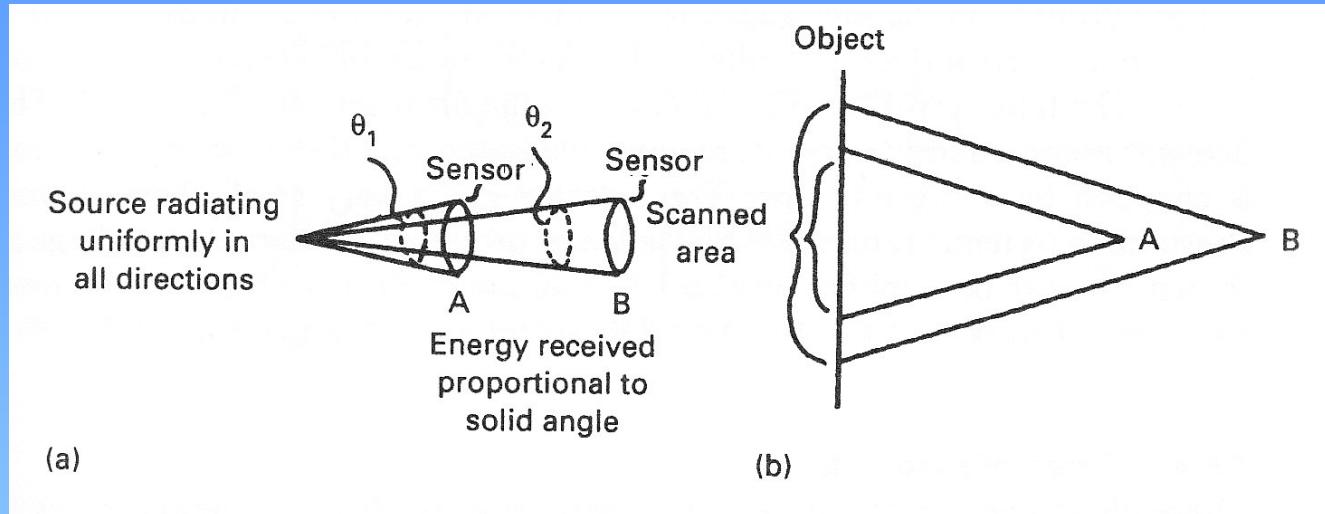
Slika 46.: Označavanje termoparova rezličitim bojama prema tipovima, te različite vrste termoparova

- Radijacijski pirometri

- Kada se neko tijelo zagrijava ono zrači elektromagnetsku energiju
- Pri niskim temperaturama zračenje se može osjetiti a pri višim temperaturama tijelo počinje emitirati i vidljivo zračenje u obliku svjetlosti (koja varira od crvene za tijelo niže temperature pa do bijele za tijelo visoke temperature)
- Ovakvo zračenje može se iskoristiti za mjerjenje temperature toga tijela pomoću pirometara
- Pirometri zbog toga omogućuju nekontaktno mjerjenje temperature tijela u uvjetima kada je potrebno npr. mjeriti temperaturu gibajućeg tijela ili tijela koje ima jako visoku temperaturu koja bi uništila ostale konvencionalne temperaturne senzore
- Prednosti pirometara su da mogu mjeriti vrijednosti temperature neovisno o udaljenosti tijela kojeg se mjeri
- Zračenje tijela pada na temperaturni senzor pirometra a to su najčešće serijski spojeni termoparovi koji se zovu još i termoćelija (*thermopile*)



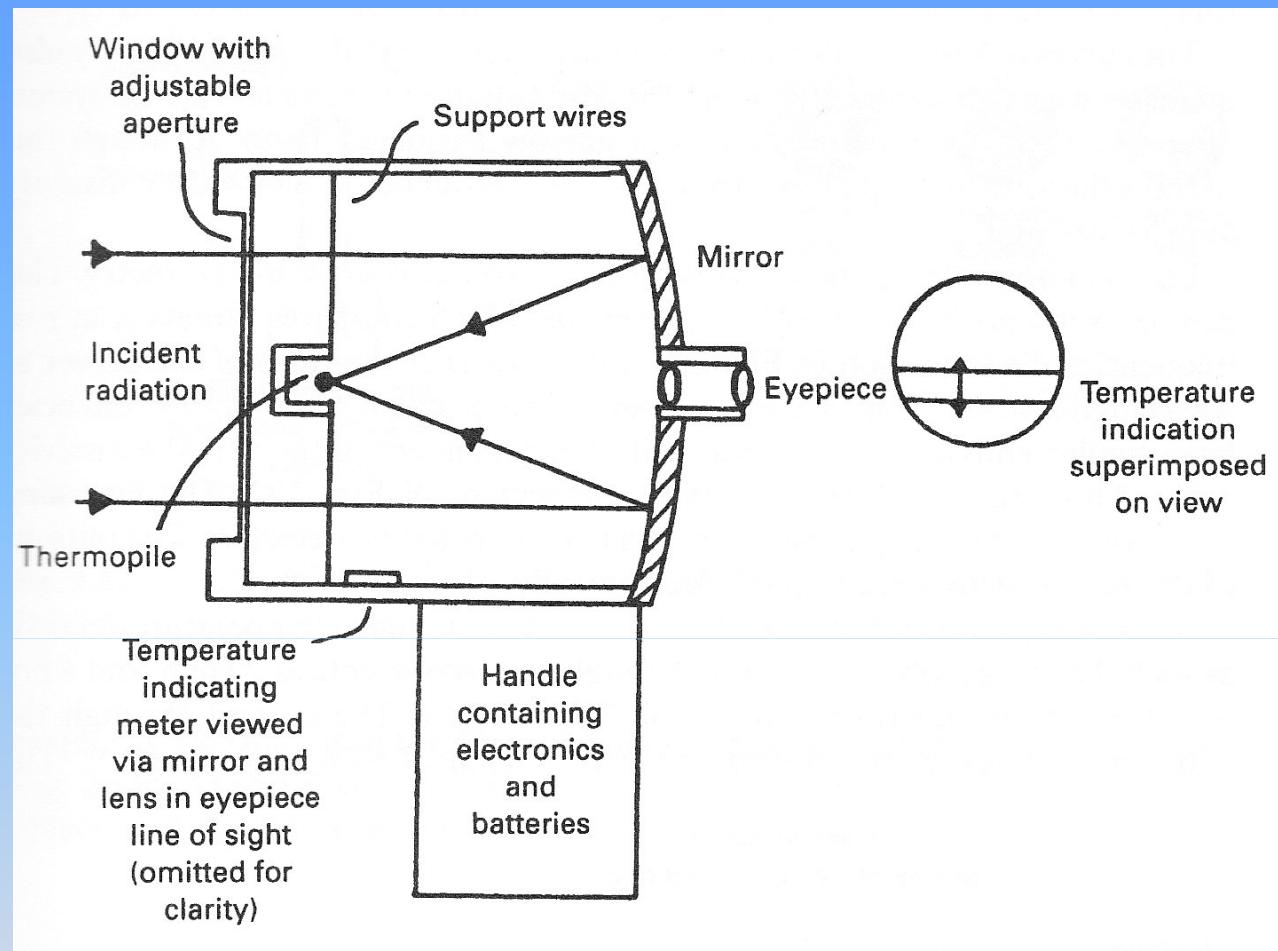
Slika 47.: Optički pirometar: a) temelji optičke pirometrije, b) termoćelija



Slika 48. Pirometrija i udaljenost od objekta mjerena:

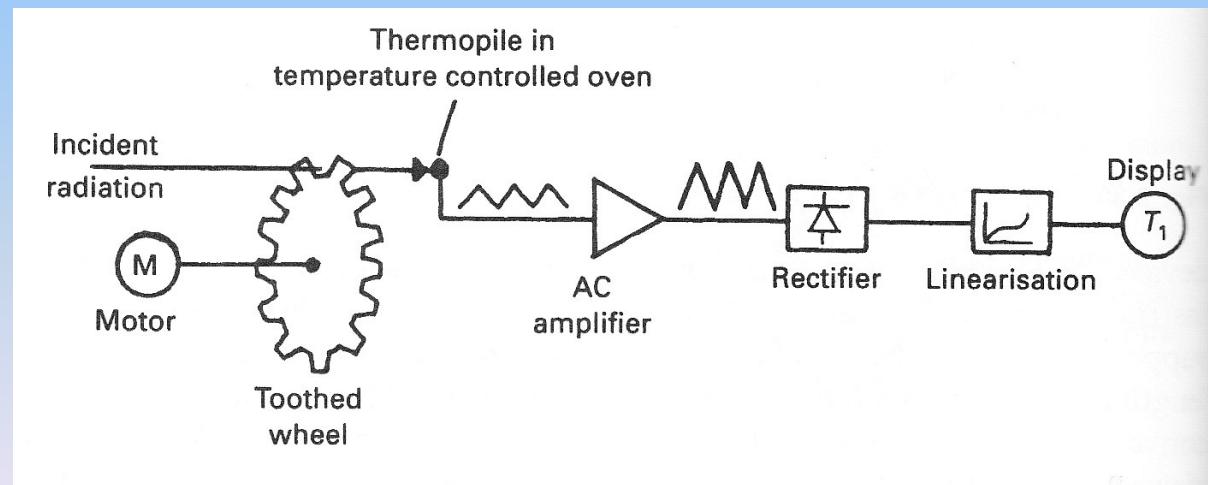
- a) zračenje primljeno od jedne točke objekta smanjuje se s njegovim udaljavanjem
- b) površina zračenja objekta povećava se njegovim udaljavanjem

- S udaljavanjem objekta koji je izvor zračenja, manja količina zračenja dolazi od izvora zračenja jer je kut radijacijskih zraka koje padaju na senzor manji
- Istovremeno površina izvora zračenja se povećava udaljavanjem objekta od senzora zračenja
- Ova dva efekta poništavaju jedan drugoga tako da je količina primljenog toplinskog zračenja na pirometru jednaka neovisno o udaljenosti objekta koji je izvor zračenja



Slika 49.: Ručni optički pirometar

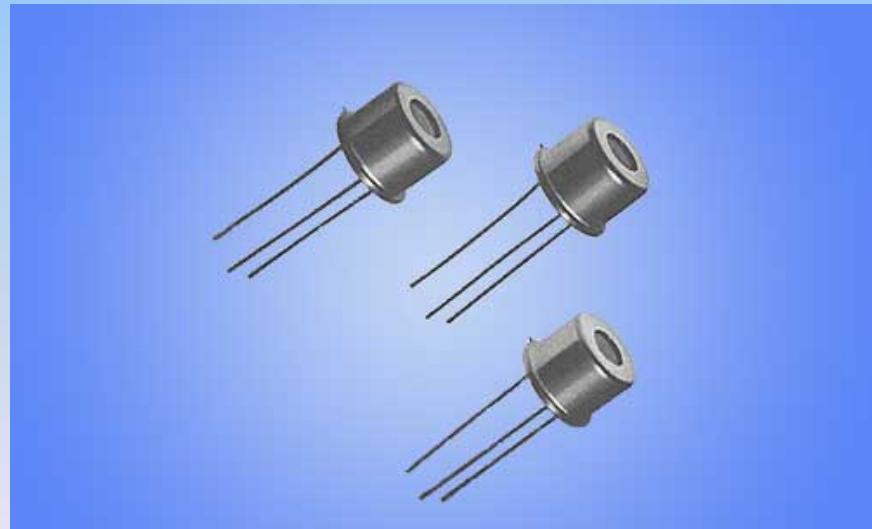
- Signal iz termoćelije je vrlo malen i vrlo nelinearan
- Jedan od načina pojačavanja i linearizacije signala prikazan je na slici 50.
- Dolazeće zračenje se prekida s nazubljenim rotirajućim diskom
- Termoćelija ima vrlo malenu toplinsku vremensku konstantu pa temperatura termoćelije raste i pada uslijed prekidanja zračenja s rotirajućim diskom
- Pad i rast temperature generira izmjenični napon koji se pojačava i ispravlja u ispravljajuču (*rectifier*), te se prije prikaza na displeju i linearizira



Slika 50.: Prekidni pirometar



Optički pirometri



Termoćelije