

2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

- compensarea joncțiunii de referință, având în vedere că, de regulă, prin intermediul cablurilor de prelungire, termocuplul este adus direct la bornele de intrare ale adaptorului;
- protecția adaptorului în situația întreruperii termocuplului (datorită sensibilității amplificatorului de c.c. utilizat la intrarea în adaptor, semnalele parazite care apar în cazul deteriorării termocuplului pot produce distrugerea acestuia);
- separarea galvanică a semnalului de ieșire din adaptor de circuitul de intrare în care se conectează termocuplul și/sau de sursele de alimentare;
- modalitatea diferită de conectare în circuit utilizând transmisia pe 2, respectiv 4 fire.

Pentru detalii a se vedea bibliografia recomandată !

2.2. Termorezistența - fig.a - se obține prin bobinarea antiinductivă, pe un suport izolant, a unui fir metalic, urmată de rigidizarea cu o rășină termorezistentă. Ca materiale pentru firul conductor se utilizează metale (Pt, Cu, Ni, Fe, Wf), sau aliaje (bronz fosforos).

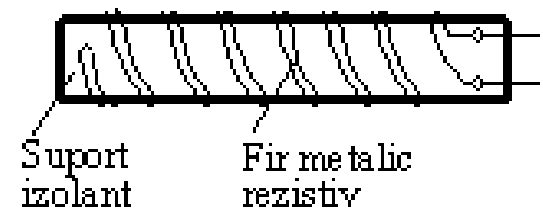


Fig.a. Termorezistență (reprezentare principială)



2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

În general, dependența $R_\theta = f(\theta)$ la o termorezistență este neliniară, însă pe intervale relativ mici de temperatură se poate scrie o dependență aproximativă:

$$R_\theta = R_{\theta_0} [1 + \alpha_{TR} (\theta - \theta_0)]$$

unde α_{TR} este coeficientul mediu de variație cu temperatura al termorezistenței, iar R_{θ_0} este rezistența la temperatura de referință θ_0 .

În scopul comparării proprietăților termice ale materialelor folosite în confecționarea elementelor sensibile se utilizează coeficientul de temperatură α_0^{100} , definit pe intervalul 0°C ... 100°C prin relația

$$\alpha_0^{100} = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad \text{sau raportul } W_{100} \text{ al rezistențelor} \quad W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}$$

unde R_0, R_{100} reprezintă rezistențele firului la 0°C , respectiv 100°C .

S-a observat experimental că α_0^{100} este cu atât mai mare cu cât puritatea metalului utilizat este mai ridicată, crescând de asemenea odată cu înlăturarea tensiunilor mecanice ale firului rezistiv.

Alte caracteristici care permit compararea termorezistențelor între ele sunt:



2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

- materialul din care este confecționat elementul sensibil (platină, cupru, nichel, mai rar wolfram și molibden);
- valoarea rezistenței la 0°C - R_0 - și eroarea sa tolerată (se construiesc termorezistențe de $100\Omega \pm 0,1\%$, $100\Omega \pm 0,2\%$, $50\Omega \pm 0,1\%$, $50\Omega \pm 0,2\%$, mai rar $46\Omega \pm 0,1\%$ și $53\Omega \pm 0,1\%$);
- constanta de timp (se disting termorezistențe cu constantă de timp mică $T \leq 15\text{s}$, medie $15\text{s} < T \leq 90\text{s}$ și mare $T > 90\text{s}$);
- intervalul de măsurare, în funcție de care există termorezistențe de joasă temperatură ($-200^{\circ}\text{C} \dots +30^{\circ}\text{C}$), de medie temperatură ($0^{\circ}\text{C} \dots +250^{\circ}\text{C}$), de înaltă temperatură ($0^{\circ}\text{C} \dots +650^{\circ}\text{C}/+850^{\circ}\text{C}$);
- gradul de protecție mecanică, climatică, antiexplozivă;
- clasa de precizie delimitată prin eroarea tolerată admisă raportului W_{100} (clasa I - $\pm 0,0005$, clasa II - $\pm 0,001$, clasa III - $\pm 0,002$).

Tipurile uzuale de termorezistențe standardizate sunt prezentate în tabelul 2.2.

2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

Tabelul 2.2. Principalele caracteristici ale termorezistențelor uzuale standardizate

Tip termorezistență	Clasa de precizie	Domeniul de măsurare	Eroarea tolerată a rezistenței R_0 [%]	Valoarea nominală pentru W_{100}	Eroarea tolerată pentru W_{100}
Platină 100Ω sau 50Ω la 0°C	I	-200 ... +650	±0,05	1,391 sau 1,385	±0,0005
	II	-200 ... +850	±0,1	1,391 sau 1,385	±0,001
Cupru 100Ω sau 50Ω la 0°C	II	-50 ... +180	±0,1	1,426	±0,001
	III	-50 ... +180	±0,2	1,426	±0,002
Nichel 100Ω la 0°C	III	-60 ... +180	±0,2	1,617	±0,004

Deși mai sensibile sunt Fe, Ni și Cu, din motive de liniaritate, cel mai bun și – în consecință – cel mai utilizat material în construcția termorezistenței este Platina deoarece are temperatura de topire foarte mare (1769°C), nu se oxidează și asigură o reproductibilitate a caracteristicii foarte bună.



2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

Rezistența nominală, dată la $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$, a termorezistenței tehnice de platină este de $100\Omega \pm 0,05\%$ (valoarea cea mai frecvent utilizată) și - mai rar - $50\Omega \pm 0,025\%$; firul rezistiv are diametrul tipic de 0,05mm, dar poate ajunge până la 0,5mm atunci când se dorește extensia limitei superioare a domeniului de utilizare. Analog termocuplului, elementul sensibil termorezistiv se introduce în teacă de protecție prevăzută cu cutie de borne.

În prezent, datorită dezvoltărilor tehnice deosebite, s-au realizat termorezistențe speciale ca:

- “rețea rezistivă” realizată prin bobinare plană pe un suport izolant (similară unei mărci tensometrice), folosită în special la măsurări de temperaturi joase;
- “peliculă rezistivă” obținută prin depunere catodică sau printr-un procedeu chimic a unui strat de platină; au rezistența nominală până în $2000\Omega \pm 0,1\%$, dimensiuni foarte mici care asigură obținerea unor constante de timp foarte mici ($<0,15\text{s}$), făcându-le oportune pentru utilizări la măsurări în medii gazoase, tunele de vânt și aer condiționat;
- “fire/pelicle calde” obținute din tungsten, platină sau aliaj platină-iridiu, cu dimensiuni foarte mici (firul cald are lungimea activă 1...2mm și diametrul 3,8...5 μm , iar pelicula caldă are grosimea tipică de 0,1 μm), permițându-se obținerea unui răspuns în frecvență foarte bun, de unde și utilizarea acestora în măsurări dinamice (tunele aerodinamice, fluide cu turbulențe etc).

2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

2.3 Termistoarele sunt rezistențe electrice realizate din materiale semiconductoare (oxizi de Mn, Ni, Co, Cu), care au un coeficient de variație cu temperatura $|\alpha| \geq (8...10) \cdot \alpha_{TR}$ (fig.b).

Dependența rezistență-temperatură respectă aproximativ o lege exponențială de forma:

$$R_T = R_0 e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

în care R_T și R_0 sunt rezistențele termistorului la temperaturile T , respectiv T_0 în [K], iar b o constantă dependentă de materialul din care este confecționat termistorul (cu valori cuprinse între 2500 și 13000 K⁻¹).

Tehnologic, termistoarele se realizează prin sinterizarea, la temperaturi înalte și în atmosfere riguros controlate, a pulberilor din oxizi semiconductori sub formă de plăcuțe, discuri, baghete, perle.

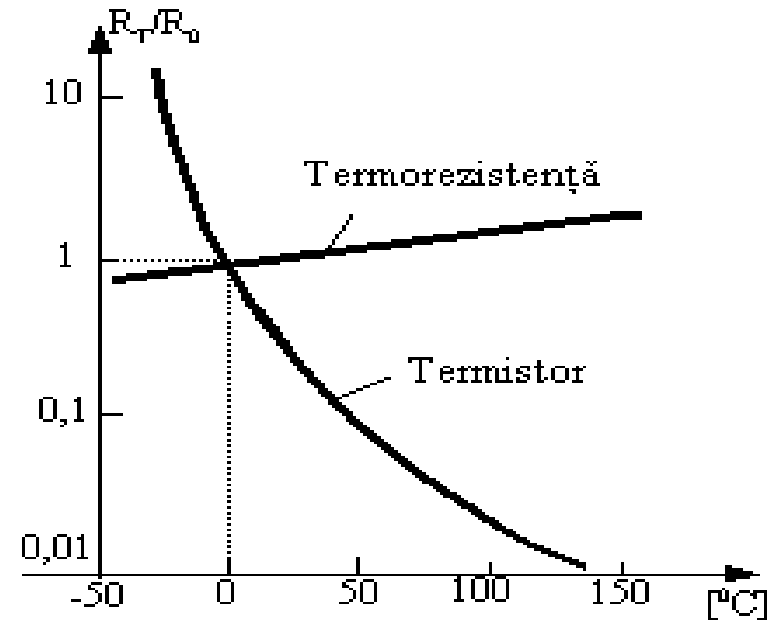


Fig.b. Raportul rezistențelor R_T/R_0 la un termistor și o termorezistență



2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

Realizările tehnologice actuale permit obținerea de termistoare cu o reproductibilitate a caracteristicii rezistență-temperatură sub 1...2%, pe domenii de utilizare cuprinse între -80°C și $+150^{\circ}\text{C}$.

Ca **avantaje** - în raport cu termorezistențele - se remarcă sensibilitatea mult mai mare, precum și valoarea nominală a rezistenței de ordinul $\text{k}\Omega$ -lor, ceea ce conduce la neglijarea rezistenței firelor de legătură.

Ca **dezavantaje**, pregnante sunt dependența puternic neliniară a rezistenței cu temperatura și reproductibilitatea slabă în procesul de fabricație. Primul dezavantaj este anulat de unele firme producătoare prin comercializarea de termistoare liniarizate, obținute prin asamblarea - în aceeași capsulă - a unui grup conținând 1...3 termistoare împreună cu rezistențe serie, paralel, paralel-serie

2.4. Elementele sensibile semiconductoare își bazează funcționarea pe dependența de temperatură a tensiunii directe - în cazul unei diode semiconductoare - respectiv a tensiunii bază-emitor - în cazul unui tranzistor - atunci când acestea sunt străbătute de un curent constant.

2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

Senzorii integrați de temperatură folosesc fie tranzistoare duale (cu un grad ridicat de împerechere) străbătute de curenți de colector diferiți, fie tranzistoare de arie diferită, străbătute de curenți de colector identici. Un exemplu de senzor integrat de temperatură, realizat cu tranzistoare identice, străbătute de curenți de colector diferiți, este sursa de curent AD 590, a cărei schemă de principiu este prezentată în fig.c. La un tranzistor bipolar în conexiunea emitor comun, curentul de colector I_c în funcție de tensiune bază-emitor U_{BE} , în cazul când $U_{BE} \gg kT/q$, este de forma:

$$I_c \cong \alpha_F I_{ES} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right) (*)$$

unde α_F este factorul de amplificare în curent direct, I_{ES} - curentul de saturație al diodei emitor-bază măsurat cu colectorul scurtcircuitat la bază, q - masa electronului, k - constanta lui Boltzmann, T - temperatura absolută.

Din relația (*) se obține:

$$U_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{\alpha_F I_{ES}}$$

rezultând o dependență liniară între U_{BE} și T în ipoteza $I_c = ct$ și neglijând efectul factorului rezidual $\alpha_F I_{ES}$.

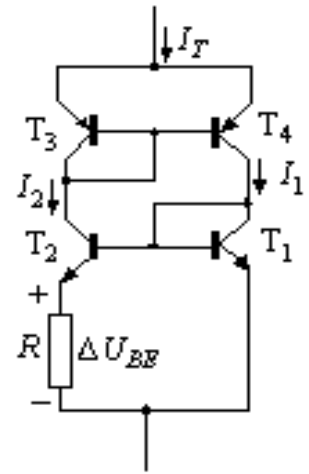


Fig.c. Schema de principiu a senzorului integrat AD 590

2. Instrumentație de temperatură bazată pe efecte termoelectrice

În cazul circuitului AD 590, tranzistorul T_2 este alcătuit din 8 tranzistoare identice cu T_1 puse în paralel, astfel că raportul $r = I_{c1}/I_{c2} = ct$, iar tensiunea diferență ΔU_{BE} , obținută pe rezistența R , este:

$$\Delta U_{BE} = U_{BE_1} - U_{BE_2} = \frac{kT}{q} \ln r$$

Datorită oglinzii de curent - realizată cu tranzistoarele T_3 și T_4 - curenții I_1 și I_2 sunt "obligați" să fie egali, deoarece tensiunile bază-emitor ale acestor tranzistoare sunt egale. În consecință:

și, prin alegerea corespunzătoare a lui R , care în procesul de fabricație se ajustează cu laser, rezultă:

$$I_T = I_1 + I_2 = 2 \frac{\Delta U_{BE}}{R} = \left(\frac{2k}{qR} \ln r \right) T$$

$$\frac{I_T}{T} = 1 \frac{\mu A}{K}$$

adică o sursă de curent, care generează un curent proporțional cu temperatura absolută în domeniul $-55^{\circ}C \dots +150^{\circ}C$ cu o precizie de $\pm 0,5^{\circ}C$; alimentarea acestui circuit se poate face de la o sursă de tensiune continuă între $+4V$ și $+30V$.

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

Această instrumentație folosește elemente sensibile capabile să detecteze radiațiile emise de corpurile încălzite.

Cu creșterea temperaturii, corpurile emit radiații termice care își modifică lungimea de undă (corpul își schimbă culoarea de la roșu la galben și apoi la alb).

Se numește *radiață energetică* E a unei surse de radiație densitatea de suprafață a fluxului energetic Φ (puterea radiației)

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad [W / m^2]$$

Densitatea spectrală de radiață energetică – *radiață spectrală* E_λ – se definește ca

$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$ iar puterea de absorbție a unui corp se caracterizează prin factorul de absorbție α definit ca raportul între fluxul energetic absorbit Φ_a și cel incident Φ ,

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi}$$

Legile radiației termice sunt riguros determinate pentru corpul negru pentru care $\alpha = 1$. Totodată, un corp negru încălzit emite în totalitate radiația energetică.

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

Astfel:

- *legea lui Planck* arată că radianța spectrală $E_{0\lambda}(T)$ este dată de relația

$$E_{0\lambda}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (*)$$

unde λ este lungimea de undă a radiației emise, c_1 și c_2 – constante, iar T temperatura absolută în [K].

- prin integrarea relației (*) se obține *legea lui Stefan-Boltzmann*:

$$E_0(T) = \int_0^{\infty} E_{0\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4$$

unde σ este constanta lui Boltzmann; *legea lui Stefan-Boltzmann* semnifică faptul că radianța integrală (totală) de emisie a corpului negru este proporțională cu temperatura absolută la puterea a patra.

- prin derivare, relația (*) conduce la *legea deplasării a lui Wien*

$$\lambda_m T = \text{ct.}$$

care arată că produsul dintre lungimea de undă λ_m corespunzătoare valorii maxime a puterii de emisie și temperatura absolută T a sursei de radiație este constant (altfel spus, spre temperaturi mai mari lungimea de undă scade).

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

- pentru corpurile reale, la care factorul de absorbție/emisie este < 1 , se definește *factorul de emisie spectrală* $\varepsilon_\lambda(T)$ egal valoric cu factorul de absorbție spectrală $\alpha_\lambda(T)$, adică

$$\varepsilon_\lambda(T) = \frac{E_\lambda(T)}{E_{0\lambda}(T)} < 1$$

care arată că puterea de emisie spectrală (radianța spectrală emisă) a unui corp real $E_\lambda(T)$ este inferioară celei a corpului negru $E_{0\lambda}(T)$.

- analog, utilizând rezultatul legii lui Stefan-Boltzmann, rezultă unde $\varepsilon(T)$ se numește *coeficient de emisivitate (factor de emisie totală)* dedus pe cale experimentală pentru materialele a căror temperatură se măsoară prin metoda pirometrică.

3.1. Pirometrele de radianță integrală se bazează pe măsurarea radianței totale conform legii lui Stefan-Boltzmann, cu corecția de emisivitate $\varepsilon(T)$.

Astfel, considerând temperatura de radianță T_r a corpului negru la care acesta emite aceeași radianță totală cu corpul real aflat la temperatura reală T_m (de măsurat), rezultă

$$\varepsilon(T_m) \cdot E_0(T_m) = E(T_m) = E_0(T_r) \quad \text{sau} \quad \varepsilon(T_m) \cdot \sigma T_m^4 = \sigma T_r^4$$

de unde $T_m = T_r \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon(T_m)}}$ și cum $\varepsilon(T_m) < 1$ rezultă $T_m > T_r$, deci se aplică rezultatului o corecție conform relației anterioare, întrucât etalonarea pirometrului se face în raport cu corpul negru.

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

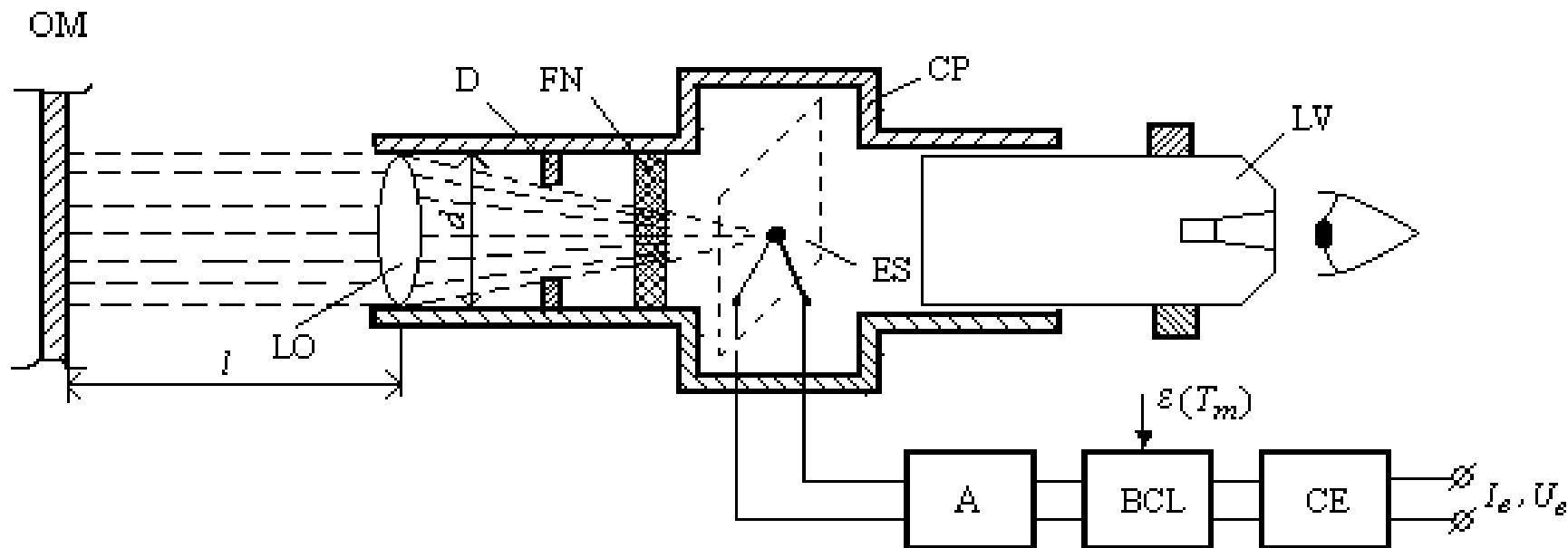


Fig.d. Pirometru de radianță integrală:

OM – obiectul măsurării; CP – corpul pirometrului; LO – lentila obiectiv; D – diafragmă; FN – filtru neutru; ES – element sensibil; LV – lunetă de vizare; A – adaptor; BCL – bloc de calcul și liniarizare; CE – convertor de ieșire

Principial, componența unui pirometru de radianță integrală este prezentată în fig.d. Radianța emisă de obiectul măsurării OM este focalizată de lentila obiectiv LO pe elementul sensibil ES, utilizând totodată o diafragmă D și un filtru neutru FN. Pentru realizarea acestui scop se folosește luneta de vizare LV prin care se uită operatorul uman.

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

Elementul sensibil este alcătuit dintr-o baterie de termocupluri înseriate având joncțiunile de măsurare dispuse circular pe un suport de platină înnegrită pentru a se apropia cât mai mult de corpul negru – fig.e.

Puterea absorbită de platina înnegrită este proporțională cu radianța integrală a corpului negru, adică

$$P_a = k_D \cdot \sigma(T_r^4 - T_D^4)$$

unde T_r este temperatura de radianță, T_D – temperatura detectorului, k_D – factor de proporționalitate.

Puterea disipată de detector către corpul pirometrului CP, acesta din urmă aflat la temperatura θ_0 , este

$$P_d = \gamma S_D (\theta_D - \theta_0)$$

unde γ este coeficientul de transmisie a căldurii, S_D – suprafața detectorului, θ_D – temperatura detectorului.

La echilibru rezultă:

$$\theta_D - \theta_0 = \frac{k_D}{\gamma S_D} \sigma(T_r^4 - T_D^4).$$

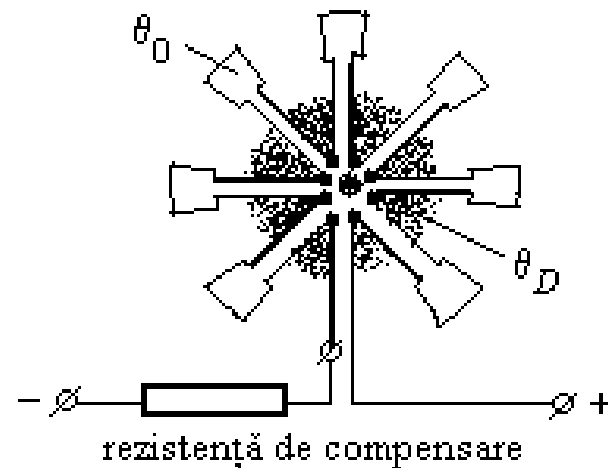


Fig.e. Elementul sensibil al pirometrului de radianță integrală

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

Cum t.t.e.m. a celor n termocupluri care alcătuiesc elementul sensibil este

$$E_{TC} \cong n K_{TC} (\theta_D - \theta_0) = n K_{TC} \frac{k_D}{\gamma S_D} \sigma (T_r^4 - T_D^4) \quad (*)$$

iar din condiția $T_D < T_r$ se obține $T_D^4 \ll T_r^4$, ceea ce conduce la aproximarea relației (*) în forma

$$E_{TC} \cong n K_{TC} \frac{k_D}{\gamma S_D} \sigma T_r^4 \quad \text{sau, ținând seama de corecție,} \quad E_{TC} = n K_{TC} \frac{k_D}{\gamma S_D} \sigma \varepsilon(T_m) T_m^4$$

care arată dependența neliniară a t.t.e.m. de temperatura de măsurat T_m . Liniarizarea se face de către blocul de calcul și liniarizare BCL, iar prin convertorul de ieșire CE se obține un curent / tensiune variind în limite unificate.

Pirometrele de radianță integrală au domeniul de la sute de °C la 2000 (2500) °C, indicele de vizare $l/d = 20 \dots 300$, măsurările fiind realizate cu o precizie de 1 ... 2%.

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

3.2. Pirometrele de radianță spectrală constau în compararea simultană a radianței monocromatice obținută de la obiectul măsurării cu cea generată de o lampă fotometrică (etalon) – fig.f.

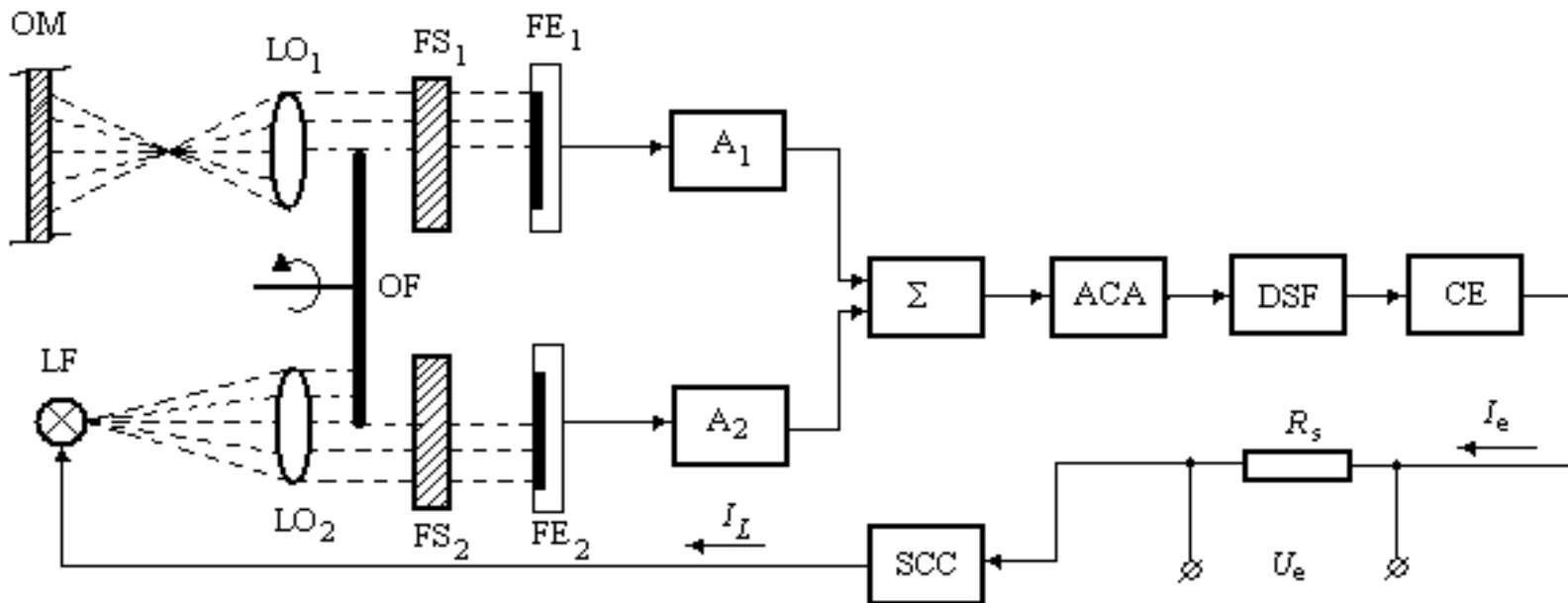


Fig.f. Pirometru de radianță spectrală:

OM – obiectul măsurării; OF – obturator cu fante; LO₁, LO₂ – lentile obiectiv; FS₁, FS₂ – filtre selective; FE₁, FE₂ – fotoelemente; A₁, A₂ – amplificatoare de fotoelement; Σ – sumator diferențial; ACA – amplificator de c.a.; DSF – detector sensibil la fază; CE – convertor de ieșire; SCC – sursă comandată în curent; R_s – rezistență de sarcină



3. Instrumentație pirometrică de temperatură

Datorită obturatorului cu fante OF, rotit cu o viteză constantă, radiațiile monocromatice obținute de la lentilele obiectiv LO₁, LO₂ și trecute prin filtrele selective FS₁, FS₂, care lasă să treacă radiațiile numai într-un domeniu îngust $[\lambda, \lambda+d\lambda]$, sunt recepționate de fotoelementele FE₁, FE₂; semnalele obținute sunt amplificate identic de A₁, A₂, sumate diferențial de Σ, amplificate în curent alternativ de ACA, demodulate sincron de detectorul sensibil la fază DSF, luând ca referință semnalul dat de lampa fotometrică LF, și aplicat convertorului de ieșire CE. Acesta (CE), prin curentul său I_e , comandă sursa comandată în curent SCC, care modifică curentul de alimentare I_L al lămpii fotometrice până când radianța monocromatică a acesteia devine egală cu cea a obiectului măsurării OM.

Pirometrele de radianță spectrală au domeniul de la 350 ... 500°C la 2500 ... 3000°C, măsurările fiind realizate cu o precizie de 0,5 ... 1,5%.

Cum relația de calcul (a se vedea legea lui Plank) arată o dependență neliniară între T și $E_\lambda(T)$, se utilizează – ca și la varianta de pirometru cu radianță integrală – un bloc de calcul și liniarizare (neexplicitat în fig.f).

3. Instrumentație pirometrică de temperatură

3.3. *Pirometrele optice cu dispariția filamentului* au funcționarea derivată din cea a pirometrelor de radianță spectrală, cu observația că operatorul face operația de comparație a radiației emise de obiectul măsurării cu cea a unei lămpi etalon – fig.g.

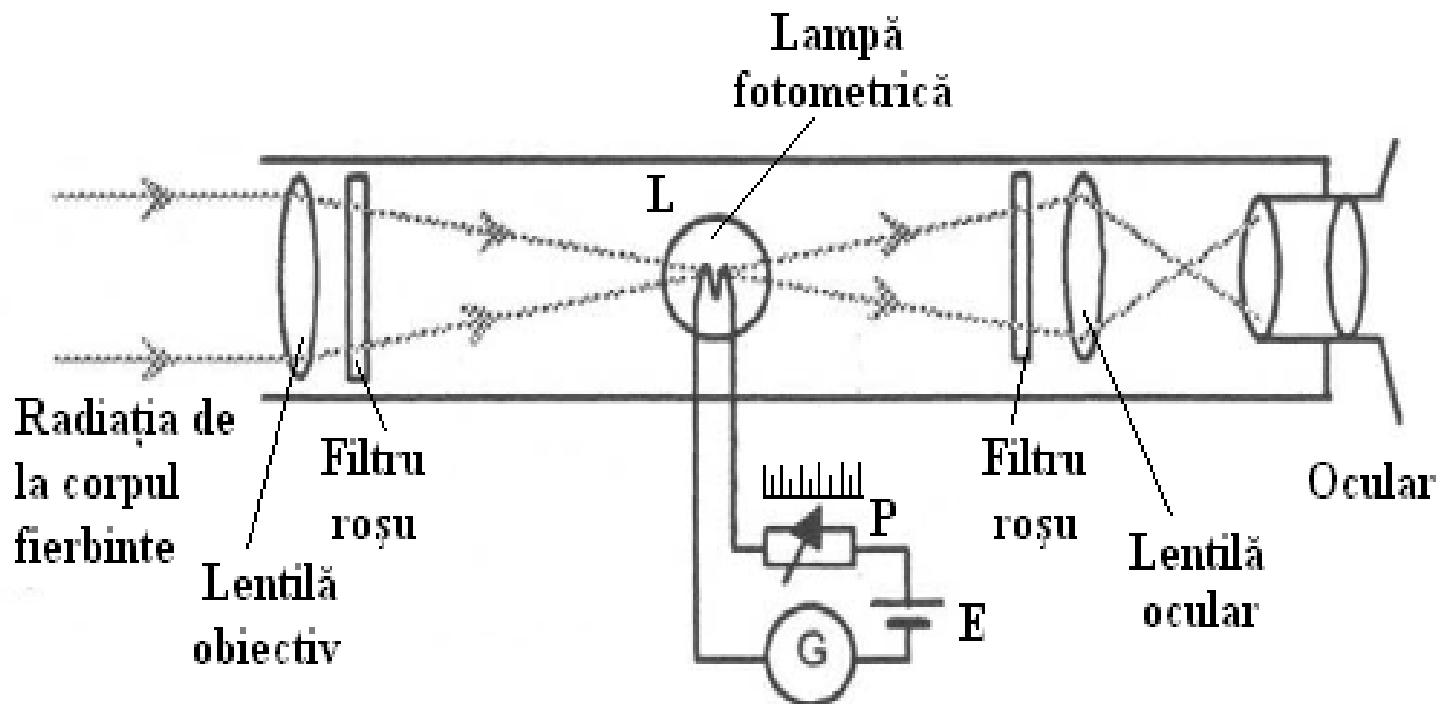


Fig.g. Pirometru optic cu dispariția filamentului

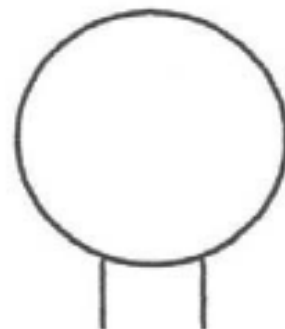
3. Instrumentație pirometrică de temperatură

Principiul de funcționare: Imaginea obținută de la radiația corpului fierbinte, a cărui temperatură se măsoară, se compară cu imaginea filamentului unei lămpi fotometrice L; altfel spus, se compară strălucirile celor două corpuri incandescente (intensitățile de radiație) pe o anumită lungime de undă.

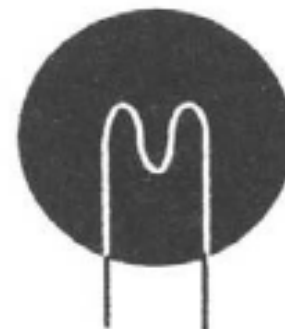
Din potențiometrul P se poate regla strălucirea lămpii etalon L, iar pe galvanometrul (miliampermetrul) G se poate citi curentul de alimentare a lămpii, ceea ce este echivalent cu a-l grada direct în unități de temperatură.



Obiect la o temperatură mai mare ca a filamentului



Obiectul și filamentul la aceeași temperatură



Obiect la o temperatură mai mică decât a filamentului

Fig.h. Imaginea obținută la pirometrul cu dispariția filamentului funcție de temperatura corpului cald în raport cu cea a lămpii fotometrice



3. Instrumentație pirometrică de temperatură

Se pot deosebi trei situații (expuse în fig.h):

- strălucirea imaginii corpului incandescent este mai intensă decât a filamentului (filamentul se vede întunecos pe un fond luminos);
- strălucirea filamentului este mai mare (filamentul este luminos pe un fond întunecos);
- când strălucirile sunt egale, filamentul nu se mai vede.

Pentru măsurarea temperaturii se modifică, cu ajutorul potențiometrului P, curentul prin filament până la dispariția acestuia. Dacă sursa E este stabilizată citirea temperaturii se poate face direct pe potențiometrul P. Dacă nu este îndeplinită această condiție, se introduce în circuit un ampermetru (galvanometru) G cu scala gradată direct în unități de temperatură.