

Capitolul 6. Rezistoare

Rezistoarele sunt elemente de circuit caracterizate prin diferite valori ale rezistenței electrice - definită ca fiind raportul dintre tensiunea aplicată rezistorului și curentul care îl parcurge. Rezistoarele liniare - cu valoare fixă sau variabilă a rezistenței - se caracterizează prin independența valorii rezistenței de tensiunea electrică, curent, sau alți factori externi. Rezistoarele a căror rezistență se modifică cu temperatura, tensiunea electrică sau cu iluminarea, se numesc termistoare, varistoare sau fotorezistoare.

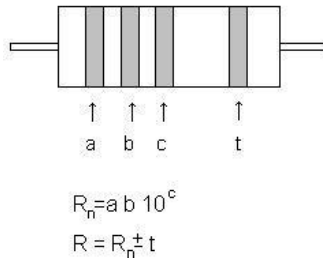
6.1. Rezistoare liniare

Din punct de vedere constructiv, rezistoarele liniare pot fi bobinate, peliculare sau de volum. Mărimile caracteristice sunt:

- **Rezistența nominală** R_n și **toleranța procentuală** t , valori care sunt normalizate și înscrise pe rezistor în clar, sau utilizând codul culorilor. Inscricțiunile în clar ale rezistenței nominale sunt formate din 3 cifre. Primele 2, reprezintă cifrele semnificative ale valorii rezistenței, iar a 3-a cifră reprezintă puterea numărului zece, care reprezintă factorul de multiplicare al primelor 2 cifre. Codul culorilor este utilizat în același mod: primele 2 benzi colorate, dispuse în apropierea extremității rezistorului, reprezintă cifrele semnificative ale valorii rezistenței, iar a 3-a bandă colorată este puterea numărului 10. Toleranța, sau abaterea maximă a valorii rezistenței față de valoarea nominală, este înscrisă pe rezistor fie în clar, fie utilizând o bandă colorată dispusă pe extremitatea opusă celei pe care s-a înscris prin benzi colorate, valoarea nominală.

Correspondența între culori și numere, sau codul culorilor, pentru valori nominale sau toleranțe, este:

| Culoare | Cifră asociată | Toleranță |
|----------------------|----------------|-----------|
| negru | 0 | - |
| maron = negru + roșu | 1 | 1% |
| roșu | 2 | 2% |
| portocaliu | 3 | - |
| galben | 4 | - |
| verde | 5 | - |
| albastru | 6 | - |
| violet | 7 | - |
| gri = negru + alb | 8 | - |
| alb | 9 | - |
| auriu | - | 5% |
| argintiu | - | 10% |



Marcarea valorii rezistenței utilizând codul culorilor.

- **Puterea nominală de disipație** P_n și **tensiunea nominală** U_n . Valorile ridicate ale rezistențelor sunt limitate de tensiunea maximă admisă, iar valorile reduse, de puterea disipată maximă admisă. În acest sens, se definește rezistența critică:

$$R_{cr} = U_n^2 / P_n. \quad (6.1)$$

Pentru majoritatea rezistoarelor de putere mică, puterea se apreciază după dimensiuni, iar pentru rezistoarele de putere, puterea este înscrisă în clar prin cifre.

Coefficientul de variație cu temperatura a rezistenței rezistorului, care are expresia:

$$\alpha_R^{[ppm]} = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta \theta}, \quad (6.2)$$

unde: R este valoarea rezistenței și θ este temperatura, coeficientul α_R este înscris în clar pe rezistoarele de precizie și se măsoară în părți pe milion. Se mai definește un coeficient de variație a valorii rezistenței sub influența factorilor externi, cum ar fi: umiditatea sau alterarea în timp, printr-un proces de îmbătrânire:

$$k^{[%]} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot 100 \quad (6.3)$$

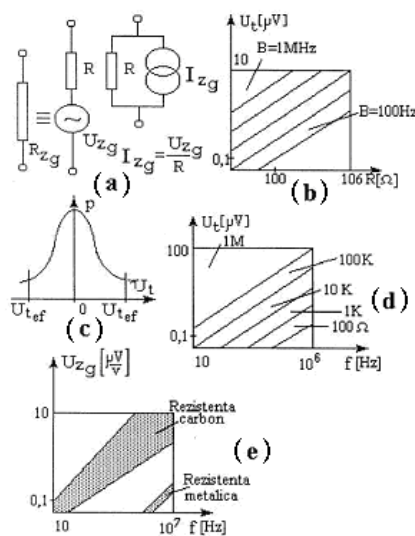


fig.6.1 Schema echivalentă a unei rezistențe cu zgomot (a), dependențele tensiunii de zgomot termic de valoarea rezistenței (b) și de frecvență (d). Distribuția tensiunii de zgomot termic (c) și dependența tensiunii de zgomot provocată de trecerea curentului prin rezistor, de frecvență (e). [Căt]

Tensiunea de zgomot este un parametru ce caracterizează rezistoarele din punct de vedere al zgomotului datorat temperaturii, sau provocat de trecerea unui curent prin rezistor.

Zgomotul termic este limita inferioară a zgomotului prezent într-un rezistor, sau într-un element de circuit care conține rezistență parazită. Reactanțele nu generează zgomot termic. Schema echivalentă a rezistorului cu zgomot este reprezentată în fig.5.1a. Tensiunea de zgomot termic, are expresia:

$$U_t = \sqrt{4kTBR} \quad (6.4)$$

unde: k, este constanta lui Boltzmann, iar B este lățimea benzii. Zgomotul termic este independent de compoziția rezistenței și temperatură, iar amplitudinea zgomotului este distribuită după o lege normală, reprezentată în figura 5.1c, unde: p, este densitatea de probabilitate și reprezintă probabilitatea ca amplitudinea zgomotului să fie cuprinsă într-un interval dU_t .

Zgomotul de contact, care pentru rezistoare se numește și zgomotul de exces, este cauzat de conductivitatea fluctuantă a rezistorului - urmare a contactului mecanic, sau electric imperfect între 2 sau mai multe materiale din care este alcătuit rezistorul. Zgomotul de contact este în raport invers cu frecvența, numindu-se și zgomot "1/f"; are amplitudine mult superioară zgomotului termic la frecvențe joase și distribuție normală a amplitudinii. Expresia curentului de zgomot de contact, este:

$$\frac{I_{zg}}{\sqrt{B}} \cong \frac{kI_{cont.med.}}{\sqrt{f}} \quad (6.5)$$

unde: B este lățimea de bandă centrată pe frecvența f, k este o constantă care depinde de tipul materialului din care este realizat rezistorul, iar $I_{cont.med}$ este valoarea mediată a curentului continuu, care parcurge rezistorul. Zgomotul de contact este cea mai importantă sursă de zgomot din circuitele de joasă frecvență și apare atunci când un material neomogen este parcurs de un curent.

În fig.6.1e este reprezentată tensiunea electromotoare de zgomot datorată trecerii curentului electric prin rezistor, în funcție de frecvență, pentru rezistoare realizate din carbon aglomerat sau pelicule din carbon, respectiv pelicule metalice. [Căt]

Rezistențele variabile prezintă suplimentar, o rezistență între cursor și elementul rezistiv, iar rezistența minimă este diferită de 0. Legea de variație a valorii rezistenței cu deplasarea liniară, sau unghiulară a cursorului, poate fi liniară, exponențială sau logaritmică. Pentru micșorarea rezistenței și zgomotului de contact, cursorul se realizează din grafit, bronz grafitat sau aliaj Cu-Zn.

Schema echivalentă și comportarea cu frecvența

Rezistorul fizic posedă pe lângă rezistență - care are ponderea maximă, capacități și inductivități parazite. Schema echivalentă, este reprezentată în fig.6.2.

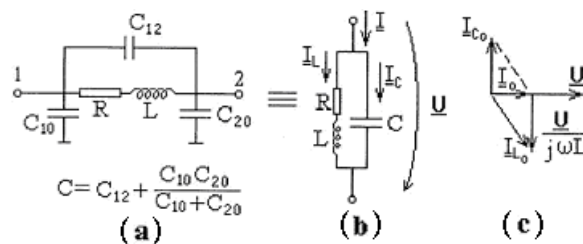


fig.6.2 Scheme echivalente ale rezistorului (a; b) și diagrama fazorială (c).

Capacitățile C_{10} , C_{20} , ale rezistorului față de masa electrică a circuitului în care este introdus, sunt parametri distribuiți, care sunt reprezentați ca parametri concentrați în figura 6.2b. Inductivitatea parazită este de ordinul nH. Expresia generală a admitanței unui circuit, este:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X}{Z^2} = G - jB \quad (6.6)$$

unde: \underline{Z} , este impedanța circuitului, X , este reactanța circuitului, G și B , sunt conductanța și susceptanța circuitului.

La rezonanță (fig. 6.2c), curenții prin cele 2 laturi ale schemei echivalente, sunt mult mai mari decât curentul I_0 de alimentare. Regimul rezonant presupune putere reactivă nulă sau defazaj nul între tensiunea aplicată circuitului și curentul prin circuit. Reactanța X și susceptanța B , sunt nule.

Pentru circuitul din fig. 6.2b, expresia admitanței este:

$$\underline{Y} = \frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} + j\omega \left(C - \frac{L}{R^2 + (\omega L)^2} \right) \quad (6.7)$$

Din condiția ca la rezonanță susceptanța circuitului să fie nulă, rezultă frecvența de rezonanță:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{C}{L} R^2} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR}{L/R}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{\tau_C}{\tau_L}}, \quad (6.8)$$

unde: τ_C , τ_L , sunt constantele de timp ale circuitului format numai din rezistență și capacitate, respectiv numai din rezistență și inductivitate. Dacă: $\frac{CR^2}{L} \ll 1$, $\omega_0 \cong \sqrt{LC}$.

Din relația 6.7, rezultă că pentru frecvențe joase și pentru: $\tau_L = \frac{L}{R} > CR = \tau_C$, inegalitate cu atât mai pronunțată, cu cât valoarea rezistenței R este mai redusă, expresia aproximativă a admitanței circuitului, este:

$$\underline{Y} \cong \frac{1}{R} - j\omega \frac{L}{R^2 + (\omega L)^2} \cong \frac{1}{R} - j\omega \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{R} - \frac{1}{j\omega L}, \quad (6.9)$$

iar caracterul circuitului este inductiv.

Pentru frecvențe ridicate, expresia aproximativă a admitanței este:

$$\underline{Y} \cong j\omega C, \quad (6.10)$$

iar caracterul circuitului este capacitiv. Susceptanța minimă a circuitului, se obține pentru: $\frac{L}{CR^2} = 1$, sau pentru $\tau_L = \tau_C$, ceea ce corespunde conform relației (6.8), unei frecvențe nule de rezonanță.

În concluzie, rezistoarele cu valori reduse ale rezistenței nominale R_n , au caracter inductiv, care pentru: $R_n > 1K\Omega$, este neglijabil, iar cele cu valori R_n ridicate, au caracter capacitiv. Rezistoarele cu valori intermediare: $R_n = 200 \div 500\Omega$, pentru care $\tau_L \cong \tau_C$, au susceptanță neglijabilă și caracter pur rezistiv într-un domeniu larg de frecvențe.

Tipuri de rezistoare

Rezistoarele bobinate sunt realizate prin înfășurarea pe un suport izolator ceramic sau din fibre de sticlă, a unui conductor cu rezistivitate ridicată și coeficient de temperatură redus, obținându-se valori ale rezistenței cuprinse între zecimi de ohm și sute de kohmi, cu toleranțe: $t < 0.1\%$. Aliajul Ni-Cr, denumit nichelină, este frecvent utilizat, întrucât coeficientul de variație cu temperatura este redus și se poate modifica sub influența tratamentului termic, devenind pozitiv sau negativ în funcție de temperatură, abaterile față de valoarea nominală fiind astfel reduse într-un interval larg de temperatură. Tensiunea termoelectromotoare - de termocuplu și tensiunea de zgomot de contact - cu terminalele realizate din Cu, sunt reduse pentru aliajul Ni-Cr. Puterea nominală a rezistoarelor bobinate este relativ ridicată, fiind în raport direct cu diametrul conductorului și dimensiunile rezistorului. Pentru micșorarea inductivităților parazite, bobinarea conductorului se poate efectua pe un suport plat, bifilar sau încrucișat.

Rezistoarele de volum sunt realizate dintr-un amestec din material conductor (grafit), un material izolant (bioxid de titan, zirconiu, caolin, etc.) și un liant (rășină formaldehidică). Rezistoarele de volum sunt neinductive, dar capacitatea lor parazită nu este de neglijat, fiind rezultatul conectării în serie și în paralel, a tuturor microcapacităților realizate între două particule conductoare, având ca dielectric materialul izolator, cu permitivitate electrică relativ ridicată. Tehnologia de realizare este simplă, dar performanțele electrice sunt mai reduse în comparație cu celelalte tipuri de rezistoare, iar dispersia valorilor rezistenței este crescută.

Rezistoarele peliculare sunt realizate prin depunerea pe un suport izolant (ceramic) a unui strat cu grosimi cuprinse între $10^{-3} \div 100 \mu m$, din carbon aglomerat sau cristalin, din metale sau aliaje metalice, sau din oxizi metalici. Stratul din carbon aglomerat este format dintr-un amestec similar celui utilizat pentru fabricarea rezistoarelor de volum, iar performanțele rezistorului sunt scăzute. Rezistoarele cu pelicule din carbon cristalin, au performanțe electrice mai bune, coeficient de temperatură negativ și sunt obținute prin reacția de piroliză (descompunere prin încălzire), a unei hidrocarburi saturate (metan, benzen, heptan). Rezistoarele cu pelicule metalice sau din oxizi metalici, au performanțe superioare: tensiuni de zgomot, toleranțe și coeficienți de temperatură reduși. Tensiunile termoelectromotoare și de zgomot, care apar la extremitățile peliculei - în contact cu terminalele din Cu, sunt reduse pentru aliajul Ni-Cr. Pelicula rezistivă este realizată și din aliaje Ni-Cu, bioxid de staniu, sau din combinații de metale și materiale izolatoare, denumite cermeturi, pentru valori mari ale rezistențelor.

6.2. Rezistoare dependente de temperatură [Căt]

Proprietatea unor materiale de modificare pronunțată a rezistivității la variațiile de temperatură, este utilizată pentru realizarea rezistoarelor dependente de temperatură, numite termistoare. Astfel de materiale sunt semiconductorii de tip "n" impurificați cu oxizi de Fe, Co, Ni, Mn, Cr, care măresc rezistivitatea și dependența de temperatură.

Expresia rezistenței unui termistor cu coeficient de temperatură negativ, este:

$$R_T = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (6.11)$$

unde: A reprezintă valoarea rezistenței la temperatura maximă admisă, iar B este o constantă proprie termistorului, cuprinsă între limitele 2000 și 4000.

Coeficientul de temperatură are expresia:

$$\alpha_R = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2}. \quad (6.12)$$

Inerția termică a termistorului cu încălzire indirectă (căldura produsă de curentul prin termistor fiind neglijabilă), este caracterizată prin constanta de timp τ , care reprezintă intervalul de timp necesar pentru ca temperatura termistorului să atingă valoarea: $1-1/e=0.622$, din valoarea temperaturii mediului în care este brusc introdus.

Termistoarele cu încălzire directă au patru terminale, două terminale fiind ale rezistenței de încălzire, izolată electric de termistorul propriu-zis. Pentru aceste termistoare, constanta de timp reprezintă intervalul de timp necesar atingerii temperaturii finale, atunci când rezistenței termistorului i se aplică un semnal treaptă de curent și poate ajunge la valori de ordinul zecilor de secunde.

În regim staționar, dependența tensiune – curent, pentru un termistor cu încălzire indirectă și coeficient de temperatură negativ, este reprezentată în figura 6.3a.

Coeficientul de disipare D, reprezintă puterea consumată pentru ridicarea temperaturii corpului cu un grad și are în consecință, expresia:

$$D = \frac{P}{T - T_{amb}} \quad (6.13)$$

unde: T_{amb} , este temperatura mediului ambiant, iar T, este temperatura de echilibru termic al termistorului încălzit prin puterea disipată P.

Cu relațiile (6.11) și (6.13) se poate arăta că există un maxim al caracteristicii tensiune-curent (fig. 6.3a), numai dacă este îndeplinită condiția: $B > 4T_{amb}$, iar temperatura la care se obține acest maxim, este cuprinsă între limitele: $45^\circ\text{C} \div 85^\circ\text{C}$. Până la atingerea tensiunii maxime U_{max} , procesul de încălzire al termistorului este indirect, căldura produsă prin puterea disipată proprie, fiind neglijabilă. Pentru valori ridicate ale curentului prin termistor: $I > I_1$, procesul de încălzire al termistorului, este un proces direct, puterea disipată determinând creșterea temperaturii termistorului.

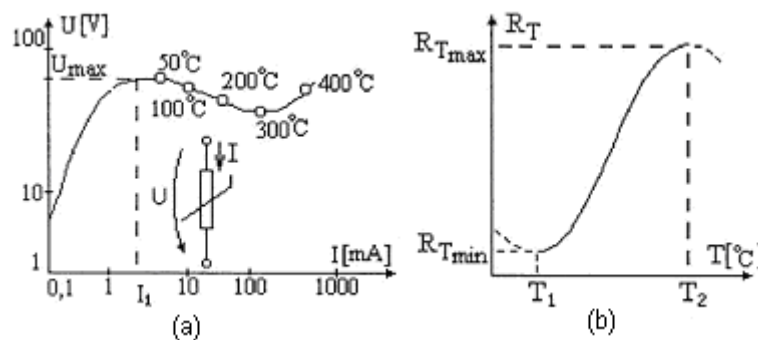


fig.6.3 Dependența tensiune-curent pentru un termistor cu coeficient de temperatură negativ (a) și dependența rezistenței de temperatură pentru un termistor cu coeficient de temperatură pozitiv (b).

Termistoarele cu coeficient de temperatură pozitiv, pot fi realizate pe bază de titanat de bariu – BaTiO₃, care este un material feroelectric. Tehnologia de fabricație este asemănătoare tehnologiei materialelor ceramice. Prin substituția ionilor bivalenți de bariu - Ba²⁺, cu ioni trivalenți de lantan - La³⁺ și a ionilor tetravalenți de titan - Ti⁴⁺, cu ioni pentavalenți de stibiu - Sb⁵⁺, se obține o conducție de tip "n". Prin tratament termic în atmosferă de oxigen, atomii de oxigen pătrund prin porii de la suprafața materialului și captează electroni, devenind în timpul răcirii, ioni negativi O²⁻. Se realizează astfel o sarcină superficială negativă, care atrage sarcina spațială pozitivă, cu formarea unor bariere de potențial de înălțime U_b, care determină apariția unei rezistențe suplimentare în termistor R_T, proporțională cu numărul n, de bariere de potențial pe unitatea de lungime, a cărei expresie este:

$$R_T \cong n \exp\left(\frac{U_b}{U_T}\right), \quad (6.14)$$

unde: U_T = kT/q, este tensiunea termică, q fiind sarcina electronului, iar valoarea la 300K, U_T = 26mV.

Bariera de potențial U_b, are o variație invers proporțională cu permitivitatea relativă ε_r' a titanatului de bariu, care depinde pronunțat de temperatură, iar pentru temperaturi superioare temperaturii Curie T_c, legea de variație este:

$$\varepsilon_r' = \frac{C}{T - T_c}, \quad (6.15)$$

unde: C, este o constantă de material (vezi 1.8.1).

Prin urmare, bariera de potențial depinde în raport direct de temperatura, sau:

$$U_b \cong \frac{T - T_c}{C}, \quad (6.16)$$

crescând ca și rezistență R_T - conform relației (6.14), cu creșterea temperaturii. Efectul de creștere a rezistenței termistorului, se manifestă într-un domeniu limitat de temperaturi, superioare temperaturii T_c (fig. 6.3b). Temperatura T₁ este cuprinsă între limitele: -30°C ÷ 180°C, iar la temperaturi superioare temperaturii T₂, electronii captați de atomii de oxigen sunt eliberați, iar înălțimea și numărul barierelor de potențial, ca și rezistența R_T, scad.

Pentru temperaturi cuprinse între T₁ și T₂, expresia rezistenței termistorului este:

$$R_T = A + C e^{BT}, \quad (6.17)$$

unde: A, B, C sunt constante caracteristice de material.

Datorită structurii granulare și valorii ridicate a permitivității ε_r', performanțele în regim dinamic ale termistorului sunt reduse prin prezența capacității parazite, care se poate considera conectată în paralel cu rezistența R_T, a termistorului.

6.3. Rezistoare dependente de tensiune [Căt]

Rezistoarele a căror rezistență este dependentă de tensiunea aplicată, se numesc varistoare. Pentru fabricarea varistoarelor, se pot utiliza materiale pe bază de carbură de siliciu - SiC, oxid de zinc - ZnO, precum și oxizi de titan, zirconiu sau mangan. Tehnologia de fabricație este asemănătoare cu tehnologia materialelor ceramice, utilizându-se un material de bază și un liant. În urma presării și sinterizării amestecului, se obțin contacte stabile între granulele din carbura de siliciu sau oxid de zinc.

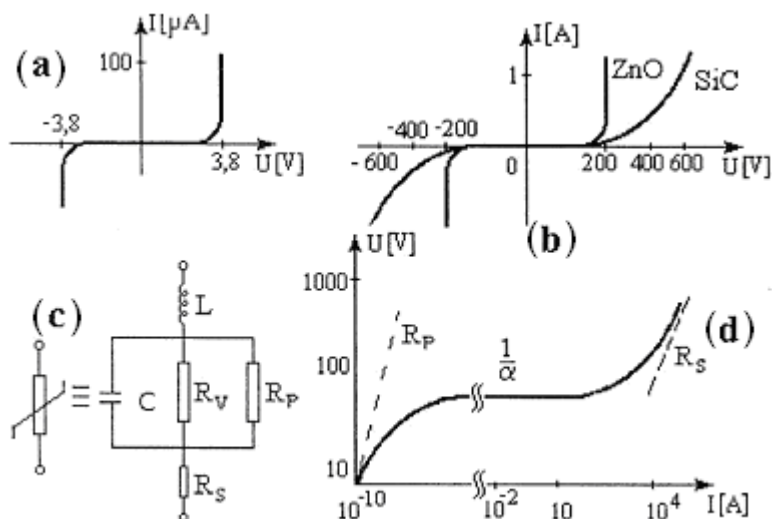


fig.6.4 Caracteristicile statice ale microvaristorului (a) și varistorului (b; d) și schema echivalenta (c).

După sinterizare, varistoarele sunt supuse unui tratament de îmbătrânire, aplicându-se impulsuri de tensiune cu amplitudine superioară tensiunii nominale. În regiunea de contact dintre 2 granule se formează un circuit serie din 2 diode în opoziție, caracteristica acestui microvaristor fiind reprezentată în fig. 6.4a. Prin conectarea serie - paralel și paralel - serie a microvaristoarelor, rezultă varistoare a căror caracteristici statice globale, sunt reprezentate în fig. 6.4b.

Schema echivalentă a unui varistor (fig. 6.4c), conține inductivitate L și capacitate C_p parazite, rezistența de scurgeri a materialului R_p și rezistența serie R_s a terminalelor. Expresia curentului prin varistor în funcție de tensiunea aplicată, este de forma:

$$I = k_1 U + k_2 U^n, \quad (6.18)$$

unde: k_1 , k_2 , sunt constante de material, iar exponentul n , este supraunitar. Curentul prin varistor crește în măsură mai mare decât crește tensiunea aplicată varistorului. O expresie aproximativă între tensiune și curent, are forma:

$$I = k U^\alpha, \quad (6.19)$$

unde: k , este o constantă de material, iar α , caracterizează gradul de neliniaritate al caracteristicii și nu depinde de temperatură. Pentru carbura de siliciu: $\alpha=5$, iar pentru oxidul de zinc: $\alpha=25$ (fig. 6.4b). Pentru varistoarele realizate din oxid de zinc, granulele conductoare din ZnO sunt separate de o fază intergranulară izolatoare cu grosime de ordinul sutimilor de μm . La tensiuni reduse aplicate termistorului, nu are loc străpungerea fazei intergranulare, curentul prin varistor este curentul de scurgeri, iar rezistența dinamică, egală cu

rezistența statică, este R_p . Pentru tensiuni aplicate mai ridicate, este valabilă relația (6.18) sau (6.19), iar rezistența dinamică a varistorului este redusă și proporțională cu $1/\alpha$. Caracteristica tensiune-curent este cu atât mai abruptă, cu cât exponentul α , are valoare mai ridicată. Procesul de străpungere a fazei intergranulare, are loc prin tranziția electronilor din banda de valență în banda de conducție (efect de tunelare). Pentru tensiuni și curenți de valori ridicate, rezistența dinamică a varistorului se mărește și rezistența serie a terminalelor devine preponderentă.

Varistoarele pot funcționa la tensiuni de ordinul nkV și curenți de ordinul nkA și sunt utilizate pentru stabilizarea tensiunilor sau limitarea curenților dintr-un circuit electric.

6.4. Rezistoare dependente de fluxul luminos [Căt]

Rezistoarele dependente de fluxul luminos se numesc fotorezistoare și funcționează pe baza efectului fotoelectric intern în materiale semiconductoare.

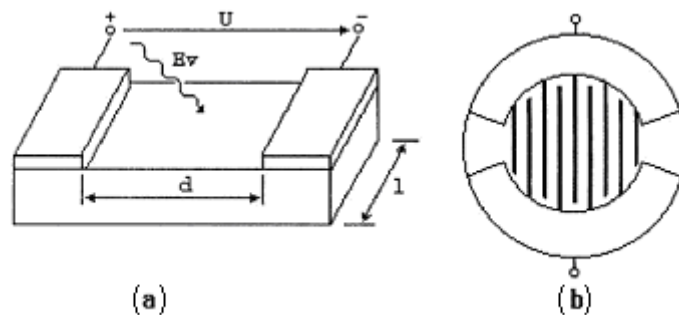


fig. 6.5 Structura simplificată (a) și interdigitală (b) a unui fotorezistor.

Considerăm structura din fig. 6.5a expusă unei iluminări, care determină apariția efectului fotoelectric (vezi anexa). Numărul electronilor eliberați pe secundă în materialul semiconductor este:

$$N = \eta I_d E_v, \quad (6.20)$$

unde: η , este o constantă ce depinde de lungimea de undă λ , a fluxului luminos sau radiant, iar E_v este iluminarea suprafeței de incidență I_d .

Prin aplicarea unei tensiuni U , mișcarea electronilor se orientează după direcția liniilor de câmp, având viteza:

$$v_n = \mu_n \frac{U}{d}, \quad (6.21)$$

unde: μ_n , este mobilitatea electronilor.

Notăm cu τ , durata medie de viață a electronilor liberi, care participă la curentul electric de conducție. Durata medie de viață a electronilor depinde de lungimea de undă λ și de iluminarea E_v :

$$\tau = \tau_0(\lambda) E_v^{-\beta}, \quad (6.22)$$

unde: β , este o constantă caracteristică materialului semiconductor. Din totalul electronilor liberi N , numai o fracțiune $v_n \tau / d$ va contribui la formarea fotocurentului, care are expresia:

$$I_{\phi} = N \frac{v_n \tau}{d} e, \quad (6.23)$$

unde: e , este sarcina electronului.

Utilizând relațiile (6.20) și (6.22), relația (6.23) obține forma:

$$I_{\theta} = \eta l d E_v \mu_n \frac{U}{d} \frac{\tau_0}{d} e E_v^{-\beta} = \eta l \mu_n U \tau_0 e \frac{1}{d} E_v^{1-\beta}, \quad (6.24)$$

Rezistența fotorezistorului are expresia:

$$R_{\theta} = \frac{U}{I_{\theta}} = \frac{d}{l} \frac{1}{\eta \mu_n \tau_0 e} E_v^{-(1-\beta)} = A E_v^{-\alpha}. \quad (6.25)$$

Pentru asigurarea unor sensibilitați și liniarități ridicate a caracteristicii de transfer, este necesar ca factorul de multiplicare A , să fie cât mai redus, iar exponentul α , cât mai ridicat. Caracteristica $I_{\theta} = f(U)$, este liniară pentru valori reduse ale tensiunii U , iar la tensiuni ridicate, panta caracteristicii scade. Constanta A , se poate micșora constructiv, prin micșorarea raportului d/l , sau prin utilizarea unor electrozi interdigitali (fig. 6.5b).

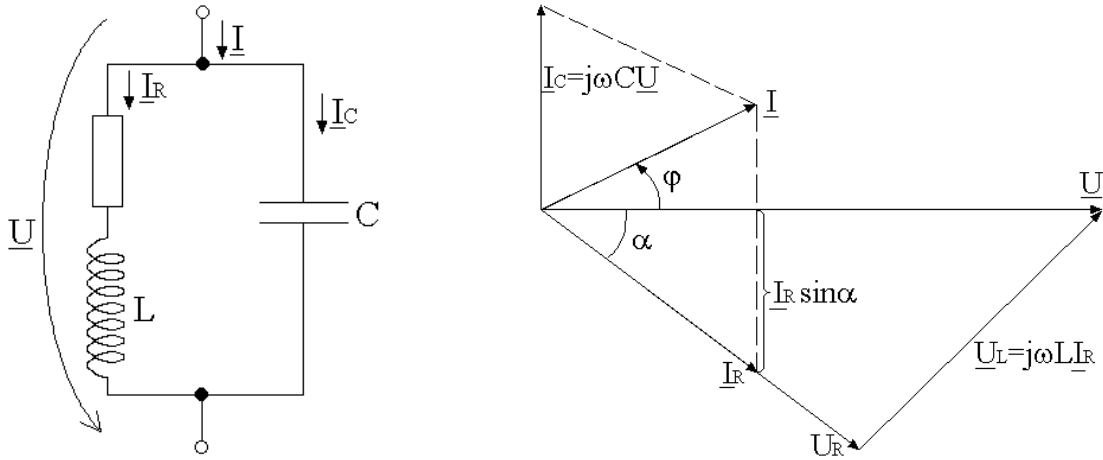
Caracteristica spectrală a fotorezistorului prezintă în general, un maxim pentru o anumită lungime de undă, pentru care sensibilitatea are valoarea maximă. Această lungime de undă poate fi situată în domeniul infraroșu pentru fotorezistoare, realizate din seleniu impurificat cu telur, sau în domeniul vizibil: $\lambda = 400 \div 730 \text{nm}$, pentru fotorezistoare realizate din sulfură de cadmiu – CdS, impurificată cu fier sau cupru.

6.5. Întrebări

1. Precizați și analizați mărimile definitorii ale unui rezistor și enumerați și caracterizați diferitele tipuri de rezistoare;
2. Să se analizeze zgomotul termic și de exces al rezistoarelor;
3. Să se descrie procedeul prin care se obțin termistoarele NTC și să se discute expresia și diagrama asociată;
4. Să se descrie procedeul prin care se obțin termistoarele PTC și să se discute expresiile și diagramele asociate;
5. Să se descrie procedeul prin care se obțin varistoare și să se discute comportarea acestora pe baza schemei echivalente și a diagramelor asociate;
6. Să se analizeze procesele care au loc într-un fotorezistor și să se deducă expresia rezistenței fotorezistorului în funcție de iluminarea lui, precum și procedeul prin care se poate mări sensibilitatea fotorezistorului prin modificarea structurii lui;
7. Care este valoarea unui rezistor marcat cu benzi colorate și a unui rezistor marcat cu cifre;
8. Analizați comportarea cu frecvența unui rezistor, pe baza schemei echivalente și stabiliți condițiile și intervalul de valori în care rezistorul are comportare rezistivă, precum și modalitățile de micșorare a componentelor reactive parazite;

6.6. Probleme

1. Sa se studieze comportarea cu frecventa a unui rezistor pe baza schemei echivalente si a diagramei fazoriale asociate.



Rezolvare:

Expresia tangentei unghiului de defazaj intre tensiune si curent este:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_C - I_R \sin \alpha}{I_R \cos \alpha} = \frac{\omega L}{R}$$

Exprimand functiile trigonometrice in functie de $\operatorname{tg} \varphi$, se obtine:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega}{R} [L - C(R^2 + \omega^2 L^2)]$$

In regim rezonant: $\operatorname{tg} \varphi = 0$, sau:

$$L = C(R^2 + \omega_0^2 L^2),$$

unde: ω_0 este pulsatia la rezonanta, a carei expresie este:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{C}{L} R^2} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{\tau_C}{\tau_L}}$$

Rezulta ca la frecvente ridicate: $\operatorname{tg} \varphi > 0$, deci curentul este defazat inaintea tensiunii si comportarea este de tip capacitiv, iar pentru frecvente joase, comportarea este de tip inductiv, curentul fiind defazat in urma tensiunii. La rezonanta, caracterul este pur rezistiv.

Admitanta schemei echivalente este de forma:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X}{Z^2} = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} + j \omega [C - \frac{L}{R^2 + (\omega L)^2}] = G - jB^2$$

Susceptanta B si de asemenea comportarea parazita minima a admitantei, intr-un domeniu larg de frecvente se obtine pentru egalitatea constantelor de timp: $\tau_L = L/R = RC = \tau_C$. Aceasta conditie este indeplinita pentru valori medii ale rezistentei R (de ordinul sutelor de ohmi). Pentru valori mai reduse ale rezistentei: $L/R > RC$, caracterul este inductiv, iar pentru valori ridicate ale rezistentei: $L/R < RC$, caracterul este capacitiv.

2. Un senzor de temperatura este realizat dintr-o placa din siliciu de grosime 1 si sectiune S. Se cunosc: latimea benzii interzise ΔE_g , concentratiile de electroni din banda de conductie N_c si valenta N_v , mobilitatile electronilor μ_n si golurilor μ_p , dependentele de temperatura ale concentratiilor de electroni:

$N_{c,v} \sim T^{1.5}$ si ale mobilitatilor: $\mu_{n,p} \sim T^{-2.5}$. Sa se determine sensibilitatea senzorului dR/dT , daca se cunosc valorile conductivitatii: σ_1, σ_2 la temperaturile T_1 si T_2 .

Rezolvare:

La conductia electrica participa ambele tipuri de purtatori de sarcina, cu concentratiile n, p , a caror expresii sunt:

$$n = N_c \exp[-(E_c - E_F)/kT]; \quad p = N_v \exp[-(E_F - E_v)/kT],$$

unde: k este constanta lui Boltzmann, iar E_F este nivelul Fermi.

Presupunem nivelul Fermi plasat la mijlocul benzii interzise. In acest caz, expresia conductivitatii este:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e(N_c \mu_n + N_v \mu_p) \exp(-\Delta E_g / 2kT), \quad (1)$$

unde: e este sarcina electronului.

Pentru ca: $N \sim T^{1.5}$ si $\mu \sim T^{-2.5}$, conductivitatea se poate scrie sub forma:

$$\sigma = \frac{B}{T} \exp(-b/T),$$

unde: B si b sunt marimi independente de temperatura. Aceasta expresie este valabila si pentru dielectrici solizi. Cu cresterea temperaturii, cresterea de tip exponential a conductivitatii este mai pronuntata decat scaderea de tip hiperbolic, in consecinta, conductivitatea va creste cu cresterea temperaturii.

Intrucat se cunosc valorile σ_1 si σ_2 la T_1 si T_2 , rezulta:

$$b = (T_1 T_2 \ln \frac{\sigma_2 T_2}{\sigma_1 T_1}) / (T_2 - T_1),$$

$$B = \sigma_1 T_1 \exp(-b/T_1) = \sigma_2 T_2 \exp(-b/T_2).$$

Expresia rezistentei senzorului de temperatura este de forma:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{T}{B} \frac{l}{S} \exp(b/T),$$

iar panta de conversie, sau sensibilitatea senzorului, este:

$$\frac{dR}{dT} = \frac{l}{BS} \exp \frac{b}{T} (1 - b/T).$$

Valorile conductivitatii pentru cele doua temperaturi se pot calcula cu relatia (1), daca se cunosc concentratiile N_c, N_v si mobilitatile μ_n, μ_p la doua temperaturi diferite.

3. Sa se calculeze toleranta si coeficientul de variatie cu temperatura al rezistentei circuitului format prin conectarea in paralel si in serie a doua rezistoare care au valorile nominale R_1 si R_2 , tolerantele t_1, t_2 si coeficientii de variatie cu temperatura α_1, α_2 .

Rezolvare:

Pentru calculul rezistentei circuitului format prin conectarea in paralel a celor doua rezistoare, $R_p = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$, se utilizeaza relatia:

$$t_p = |h_1| t_1 + |h_2| t_2,$$

unde:

$$h_1 = \frac{R_1}{R_p} \frac{\partial R_p}{\partial R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

$$h_2 = \frac{R_2}{R_p} \frac{\partial R_p}{\partial R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

Prin inlocuire, rezulta:

$$t_p = \frac{R_2 t_1 + R_1 t_2}{R_1 + R_2}.$$

Coeficientul de variatie cu temperatura are expresia:

$$\alpha_p = h_1 \alpha_1 + h_2 \alpha_2 = \frac{R_2 \alpha_1 + R_1 \alpha_2}{R_1 + R_2}.$$

Pentru circuitul realizat prin conectarea in serie a celor doua rezistoare se utilizeaza aceeasi relatie pentru calculul tolerantei, rezultand:

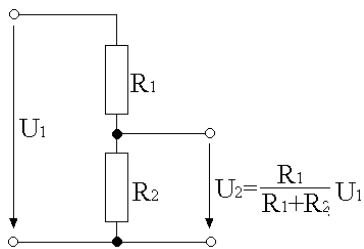
$$t_s = \frac{R_1 t_1 + R_2 t_2}{R_1 + R_2}.$$

Coeficientul de variatie cu temperatura se determina cu aceeași relatie ca și cea utilizată pentru circuitul paralel, rezultand:

$$\alpha_s = \frac{R_1 \alpha_1 + R_2 \alpha_2}{R_1 + R_2}.$$

Relatii similare se pot obtine pentru doua condensatoare conectate in serie sau in paralel.

4. Sa se determine toleranta și coeficientul de variatie cu temperatura a tensiunii U_2 cunoscand valorile rezistentelor, tolerantelor și coeficientii de variatie cu temperatura.



$$\begin{aligned} R_1 &= 1k\Omega; t_1 = \pm 5\% ; \alpha_1 = \pm 100 ppm/^\circ C, \\ R_2 &= 2k\Omega; t_2 = \pm 5\% ; \alpha_2 = \pm 100 ppm/^\circ C, \\ U_1 &= 10V; t_3 = \pm 2.5\% ; \alpha_3 = \pm 100 ppm/^\circ C. \end{aligned}$$

Rezolvare:

Toleranta tensiunii U_2 are expresia:

$$t_{U_2} = |h_1| t_1 + |h_2| t_2 + |h_3| t_3,$$

unde:

$$h_1 = \frac{R_1}{U_2} \frac{\partial U_2}{\partial R_1} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$$h_2 = \frac{R_2}{U_2} \frac{\partial U_2}{\partial R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$$h_3 = \frac{U_1}{U_2} \frac{\partial U_2}{\partial U_1} = 1.$$

Cu aceste expresii, toleranta tensiunii U_2 are valoarea:

$$t_{U_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (t_1 + t_2) + t_3 = 5.83\%.$$

Intrucat coeficientii α_i au valori pozitive sau negative, coeficientul de variatie cu temperatura al tensiunii U_2 , are valoarea:

$$\alpha_{U_2} = h_1\alpha_1 + h_2\alpha_2 + h_3\alpha_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(\alpha_2 - \alpha_1) + \alpha_3 = \pm 166 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$

5. Un rezistor cu valoarea nominala a rezistentei: $R_n=820\text{k}\Omega$, functioneaza la o temperatura cuprinsa in intervalul $[-40^\circ\text{C}, +100^\circ\text{C}]$. Sa se calculeze curentul maxim care poate parcurge rezistorul stiind ca puterea nominala este: $P_n=1\text{W}$, tensiunea maxima este $U_{\max}=500\text{V}$, temperatura nominala si maxima sunt $\theta_n=70^\circ\text{C}$, $\theta_{\max}=130^\circ\text{C}$.

Rezolvare:

Puterea nominala reprezinta puterea maxima disipata de rezistor la functionare indelungata, intr-un mediu ambiant a carui temperatura este cel mult egala cu temperatura nominala. Temperatura maxima este temperatura la care poate ajunge rezistorul care disipa puterea nominala intr-un mediu ambiant cu temperatura nominala θ_n . Factorul de disipatie D este inversul rezistentei termice R_{th} :

$$D = \frac{1}{R_{th}} = \frac{P_n}{\theta_{\max} - \theta_n},$$

iar puterea activa P_a , dezvoltata in rezistor este o functie de temperatura θ_a a mediului ambiant:

$$P_a = P_n, \text{ pentru } \theta_a \leq \theta_n,$$

$$P_a = P_n \frac{\theta_n - \theta_a}{\theta_{\max} - \theta_n}, \text{ pentru } \theta_a > \theta_n.$$

La $\theta_a=100^\circ\text{C}$, rezistorul poate disipa puterea:

$$P_a = P_n \frac{\theta_n - \theta_a}{\theta_{\max} - \theta_n} = 0.5\text{W}.$$

Tensiunea la bornele rezistorului are valoarea:

$$U = \sqrt{P_a R_n} = 640\text{V} > U_{\max}.$$

Prin urmare, puterea maxima disipata de rezistor este:

$$P_{\max} = \frac{U_{\max}^2}{R_n} = 0.3\text{W}.$$

Curentul maxim prin rezistor are valoarea:

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R_n}} = 0.6\text{mA}.$$

6. Sa se determine tipurile de rezistoare si valorile R_1 , R_2 , astfel incat prin conectarea rezistoarelor in serie sa rezulte rezistenta echivalenta: $R_s=3\text{k}\Omega$, coeficient de variatie cu temperatura: $\alpha=0$ si toleranta $t_s=\pm 10\%$. Rezistenta R_s este parcursa de un curent: $I=10\text{mA}$ si functioneaza intr-un mediu ambiant cu temperatura cuprinsa in intervalul $[-10^\circ\text{C}, +60^\circ\text{C}]$.

Rezolvare:

Cele doua conditii impuse conexiunii serie sunt:

$$R_s = R_1 + R_2,$$

$$\alpha_s = \frac{R_1\alpha_1 + R_2\alpha_2}{R_1 + R_2} = 0.$$

Din relatia:

$$R_1\alpha_1 + R_2\alpha_2 = 0,$$

rezulta ca rezistentele R_1 si R_2 se vor alege astfel incat coeficientii de variatie cu temperatura sa fie cu semn opus. Prin urmare, un rezistor va fi de tip RCG, cu $\alpha_1 = -400 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, iar celalalt va fi de tip RBC, cu $\alpha_2 = 200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Raportul valorilor celor doua rezistoare este:

$$\frac{R_1}{R_2} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = 2,$$

iar suma lor este:

$$R_1 + R_2 = 3R_2 = 3 \text{ k}\Omega.$$

Rezulta: $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$.

Puterile disipate pe rezistoarele R_1 si R_2 sunt:

$$P_1 = R_1 \cdot I^2 = 0.1 \text{ W},$$

$$P_2 = R_2 \cdot I^2 = 0.2 \text{ W},$$

iar tensiunile pe cele doua rezistoare sunt:

$$U_1 = R_1 \cdot I = 10 \text{ V},$$

$$U_2 = R_2 \cdot I = 20 \text{ V}.$$

Toleranta rezistentei R_s are expresia:

$$t_s = \frac{R_1 t_1 + R_2 t_2}{R_1 + R_2} = \frac{t_1 + 2t_2}{3} = 10\%,$$

de unde rezulta tolerantele celor doua rezistoare:

$$t_1 + 2t_2 = 30\%,$$

$$t_1 = t_2 = \pm 10\%.$$

Se va studia aceeaasi problema pentru conexiunea paralel a celor doua rezistoare.

7. Sa se determine toleranta si coeficientul de variatie cu temperatura pentru conexiunea serie a unui termistor cu un rezistor. Se presupun cunoscute valorile nominale R_T si R si coeficientii de variatie cu temperatura: α_T si α_R .

Rezolvare:

Rezistenta termistorului echivalent este: $R_e = R_T + R$.

Toleranta t_e a termistorului echivalent, are expresia:

$$t_e = |h_1|t_1 + |h_2|t_2,$$

unde:

$$h_1 = \frac{R_T}{R_e} \frac{\partial R_e}{\partial R_T} = \frac{R_T}{R + R_T},$$

$$h_2 = \frac{R}{R_e} \frac{\partial R_e}{\partial R} = \frac{R}{R + R_T}.$$

Rezulta:

$$t_e = \frac{R_T t_T + R t_R}{R + R_T}.$$

Coeficientul de variatie cu temperatura α_e al termistorului echivalent, tinand cont ca: $\alpha_T \gg \alpha_R$, este:

$$\alpha_e = h_1 \alpha_T + h_2 \alpha_R = \frac{R_T \alpha_T + R \alpha_R}{R + R_T} \cong \frac{R_T \alpha_T}{R + R_T}.$$

Se va studia aceeași problema pentru conexiunea paralelă a celor două componente.

8. Să se determine valoarea rezistenței R care se conectează în paralel cu un termistor cu coeficient de variație cu temperatura negativ, a cărui valoare la 25°C este: $R_{T,25}=130\Omega$ și constanta $B=3300\text{K}$, astfel încât coeficientul de variație cu temperatura al termistorului echivalent, la 40°C să fie de $-2\%/^\circ\text{C}$. Se neglijează coeficientul α_R de variație cu temperatura al rezistorului.

Rezolvare:

Rezistența termistorului echivalent este: $R_e = \frac{R_T R}{(R_T + R)}$.

Coeficientul de variație cu temperatura al termistorului echivalent, este de forma:

$$\alpha_e \cong \frac{R\alpha_T}{R + R_T}$$

Rezistența termistorului cu coeficient $\alpha_T < 0$, este:

$$R_T = A \cdot \exp(B/T),$$

unde: constanta A se determină din valoarea rezistenței termistorului la 25°C :

$$A = \frac{130}{\exp(3300/298)} = 2 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

Rezistența termistorului la 40°C , are valoarea:

$$R = A \cdot e^{\frac{B}{313}} = 75.8 \Omega,$$

iar coeficientul de variație cu temperatura al termistorului la temperatura de 40°C , este:

$$\alpha_{40} = -\frac{B}{T^2} = -\frac{3300}{313^2} = -3.36\%.$$

Impunând valoarea coeficientului α_e :

$$\alpha_e \cong \frac{R\alpha_T}{R_T + R} = -2\%/^\circ\text{C},$$

rezulta:

$$R = \frac{R_T \alpha_e}{\alpha_T - \alpha_e} = 111.5 \Omega.$$

Pentru rezistor se adoptă valoarea nominalizată $R=110\Omega$.

Se va studia aceeași problemă pentru conexiunea serie a celor două componente.

9. Să se calculeze curentul maxim printr-un rezistor cu valorile nominale: $R_n=100\Omega$, $P_n=0.5\text{W}$, $U_n=150\text{V}$, conectat în serie cu un termistor cu coeficient de variație cu temperatura negativ, având parametri: $R_{25}=62\Omega$, $P_n=0.6\text{W}$, $B=330\text{K}$, $D=9.5\text{mW}/^\circ\text{C}$, care în funcționare atinge temperatura de 85°C . Circuitul funcționează la temperaturi cuprinse în intervalul $[0, 45^\circ\text{C}]$.

Rezolvare:

Puterea disipată de un termistor și evacuată mediului ambiant, este de forma:

$$P_{ev} = D(T_c - T_a) - D \cdot \Delta T,$$

unde: D este coeficientul de disipare termica, egal cu inversul rezistentei termice a termistorului fata de mediul ambiant, T_c este temperatura corpului termistorului, T_a este temperatura mediului ambiant, iar ΔT este supracresterea temperaturii corpului termistorului fata de mediul ambiant.

In regim termic stationar, puterea disipata este in totalitate cedata mediului ambiant:

$$P_d = R_T \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_T} = P_{ev}.$$

Tinand cont de expresia rezistentei termistorului:

$$R_T = A \cdot \exp(B/T),$$

se obtin expresiile tensiunii si curentului prin termistor in functie de temperatura:

$$U = \sqrt{D(T - T_a) \cdot A \cdot \exp(B/T)},$$

$$I = \sqrt{D(T - T_a) \cdot \exp(B/T) / A}.$$

Valorile maxime ale curentilor prin rezistor si termistor sunt:

$$I_{R_{max}} = \sqrt{\frac{P_n}{R_n}} = 70.7 \text{ mA},$$

$$I_{T_{max}} = \sqrt{\frac{P_{d_{max}}}{R_T}} = \sqrt{\frac{D(\theta_{max} - \theta_a)}{R_T}}.$$

Puterea maxima disipata in termistor are valoarea:

$$P_{d_{max}} = D(\theta_{max} - \theta_a) = 0.38 \text{ W} < P_n,$$

iar constanta A are valoarea:

$$A = R_{25} / \exp(B/T) = 0.96 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

Rezistenta termistorului la 85°C este:

$$R_{85} = A e^{\frac{B}{358}} = 9.67 \Omega,$$

iar curentul maxim prin termistor la 85°C are valoarea:

$$I_{T_{max}} = \sqrt{\frac{0.38}{9.67}} = 198.2 \text{ mA}.$$

Prin urmare, curentul maxim admisibil prin circuitul serie este:

$$I_{max} = \min\{I_{R_{max}}, I_{T_{max}}\} = I_{R_{max}} = 70.7 \text{ mA}.$$

6.7. Anexe

6.7.1. Unități de măsură radiometrice și fotometrice

| Radiometrie | | | Fotometrie | | |
|------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------------|----------|--|
| | Simbol | Unități | | Simbol | Unități |
| Energie radiantă | Q_e | J | Energie luminoasă | Q_v | $\text{lumen} \cdot s$ |
| Putere radiantă flux radiant | Φ_e | W | Putere luminoasă flux luminos | Φ_v | $\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{Sr}$ |
| Iluminare energetică | E | W/m^2 | Iluminare | E_v | $\text{lm}/\text{m}^2 = \text{lux}$ |
| Intensitate radiantă | I_e | W/Sr | Intensitate luminoasă | I_v | $\text{lm}/\text{Sr} = \text{cd}$ |
| Radianță specifică | | $\text{W}/\text{m}^2\text{S}$ r | Strălucire | | $\text{lux}/\text{Sr} =$ $\text{lm}/\text{m} \cdot \text{Sr}$ |

Candela este unitatea de măsură fundamentală și reprezintă intensitatea luminoasă a unei suprafețe de $1/600000 \text{ m}^2$ de corp negru la temperatura de solidificare a platinei, în direcție normală.

Un watt este echivalent cu 680 lumen la lungimea de undă de 565 nm, care corespunde culorii galben verzui situată la mijlocul spectrului vizibil – cu lungimi de undă cuprinse între 400 nm (violet) și 730 nm (rosu).

6.7.2. Toleranța globală a valorii, este abaterea relativă maximă a valorii reale x_r față de valoarea nominală x_n , în condițiile acțiunii simultane a tuturor factorilor care influențează valoarea: $t_g = (x_{\max} - x_n)/x_n$. Având în vedere că toleranța t , coeficientul de variație cu temperatura α_T și coeficientul de variație a valorii sub acțiunea unui factor extern K_j , au expresiile:

$$t = \pm \max \left| \frac{x_r - x_n}{x_n} \right|,$$

$$\alpha_T = \frac{1}{x} \frac{dx}{dT},$$

$$K_j = \frac{x_j - x_0}{x_0},$$

unde: x_j și x_0 , sunt valorile înainte și după acțiunea factorului j , valoarea maximă are expresia:

$$x_{\max} = x_n(1+t)(1+|\alpha|\Delta T)(1+\sum_{j=1}^n K_j),$$

iar expresia toleranței globale este:

$$t_g = t + |\alpha|\Delta T + \sum_{j=1}^n K_j + t|\alpha|\Delta T + t\sum_{j=1}^n K_j + |\alpha|\Delta T \sum_{j=1}^n K_j + t|\alpha|\Delta T \sum_{j=1}^n K_j.$$

Întrucât mărimile $t|\alpha|\Delta T$ și K_j , sunt relativ reduse, ele pot fi neglijate, la fel ca și produsele lor, iar expresia toleranței globale devine:

$$t_g = t + |\alpha| \Delta T + \sum_{j=1}^n K_j.$$

Intervalul de temperatură se poate considera în mod acoperitor, ca fiind:

$$\Delta T = \Delta \theta = \max\{T_{c_{\max}} - T_0, T_0 - T_{c_{\min}}\} = \max\{\theta_{c_{\max}} - \theta_0, \theta_0 - \theta_{c_{\min}}\},$$

unde: $T_{c_{\max}}(\theta_{c_{\max}})$, $T_{c_{\min}}(\theta_{c_{\min}})$, sunt temperaturile maximă și minimă a corpului componenteii, iar $T_0(\theta_0)$ este temperatura la care se măsoară valorile nominale (20°C sau 25°C).

O componentă care funcționează într-un mediu cu temperatura: $T_a \in [T_{c_{\max}}, T_{c_{\min}}]$, are temperatura corpului: $T_c = T_a + \Delta T_p$, unde ΔT_p , este creșterea de temperatură datorată acumulării în corpul componenteii, a unei părți din cantitatea de căldură care se disipă în componentă. În majoritatea cazurilor se poate considera $T_c \cong T_a$.

6.7.3. Toleranța și coeficientul de variație cu temperatură al parametrului unui circuit electronic se determină în funcție cu temperatură ai componentelor.

Considerăm un circuit alcătuit din componente caracterizate prin valorile: x_1, x_2, \dots, x_i , iar semnalele de intrare independente între ele sunt: x_{i+1}, \dots, x_n . Se va determina toleranța și coeficientul de variație cu temperatură al unui parametru $f = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ în funcție de toleranțele și coeficienții de variație cu temperatură ai mărimilor x_1, x_2, \dots, x_n .

Prin definiție toleranța parametrului f este:

$$t_f = \max\left\{\frac{f_{\max} - f_0}{f_0}, \frac{f_0 - f_{\min}}{f_0}\right\},$$

unde: $f = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$.

Prin dezvoltare în serie Taylor a parametrului f , rezultă pentru toleranța, expresia:

$$t_f = \sum_{i=1}^n |h_i| t_i,$$

unde: $h_i = \frac{x_i}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} x_i = x_{i0}$, iar t_i toleranța mărimii x_i .

Coeficientul de variație cu temperatură a parametrului f , are expresia:

$$\alpha_f = \sum_{i=1}^n |h_i| \alpha_i,$$

unde: α_i este coeficientul de variație cu temperatură a mărimii x_i .