

Rezistoare liniare fixe

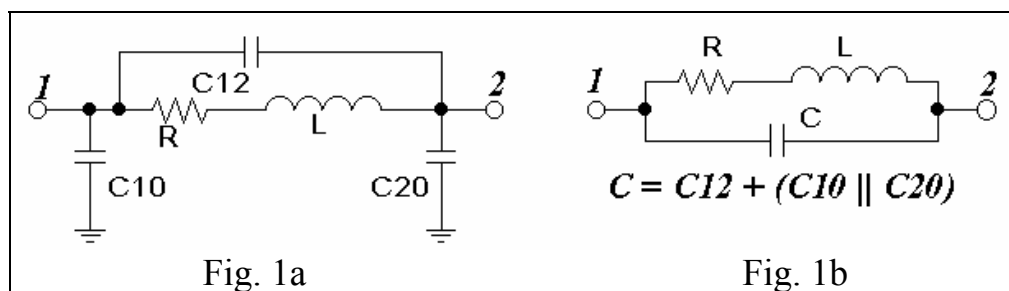
Scopul lucrării : Determinarea variației rezistenței rezistorului real cu temperatura și a elementelor reactive parazite.

Rezistorul ideal este o componentă electronică pasivă caracterizată de un raport constant, între tensiunea la borne și curentul ce o străbate, numit **rezistență electrică**.

$$(1) \quad R = V/I$$

În cazul **rezistorului ideal** se poate considera că valoarea rezistenței este independentă de forma și valorile tensiunii aplicate, respectiv ale curentului, aceasta valoare depinzând numai de dimensiunile geometrice ale rezistorului, de natura materialului rezistiv (caracterizat prin rezistivitatea $\rho = 1/\sigma$, aceasta mai numindu-se **rezistența specifică** sau rezistența cubului unitar) și de temperatura corpului său

Rezistorul real (tehnic) diferă de cel ideal deoarece curentul electric ce străbate terminalele și corpul său generează și un câmp magnetic, putându-se vorbi de o inductanță parazită L . De asemenea, apar capacități parazite datorate prezenței suportului izolator și a diferenței de potențial dintre extremități (sau dintre spirele rezistive) precum și dintre extremități și masă. Schema echivalentă a rezistorului real se prezintă în fig. 1. a), b), cu observația că această schemă poate fi completată cu elemente specifice fiecărui tip de rezistor.



Admitanța echivalentă se scrie :

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

Din (1) rezultă că pentru frecvențe mari rezistorul se comportă capacitiv iar pentru frecvențe mici se comportă inductiv dacă se îndeplinește $L/(CR^2) > 1$. Valoarea minimă a componentei reactive se obține pentru $L/(CR^2) = 1$ într-un domeniu larg de frecvențe.

Rezistorul fix are rezistența stabilită definitiv la fabricație, spre deosebire de rezistorul variabil a cărui rezistență poate suferi modificări (efectuate de utilizator) între două limite extreme fixate prin fabricație.

Rezistoarele fixe se încadrează în una din categoriile :

1. **Stabilitate mare** - au stabilitatea de 1-2 % sau mai bună (rezistoare bobinate, rezistoare cu peliculă metalică sau din oxizi metalici, rezistoare termotropice, rețele rezistive),

2. **Aplicații generale** - rezistoare mai ieftine și mai puțin stabile (rezistoare de volum și cu peliculă de carbon).

Fizic, rezistorul constă dintr-un element rezistiv depus (fixat) pe un suport izolator sau dintr-un element omogen conductor, și este prevăzut cu terminale pentru conectare în circuit (variante clasică). În tehnologia de montare pe suprafață (SMD) rezistoarele sunt pelicule rezistive depuse direct pe cablajul de circuit imprimat și sunt protejate corespunzător împotriva acțiunii mediului.

Parametrii uzuali ai rezistorului

1. Rezistența nominală R_n [Ω]

Reprezintă valoarea rezistenței electrice marcată pe corpul rezistorului. În ideea de a reduce numărul valorilor nominale de rezistențe, pentru a le putea produce mai ușor, stoca și echivala (între diverse firme), s-au stabilit clase de valori preferate. În plus, în urma procesului de fabricație, se obțin valori împrăștiate față de cea dorită. Pentru a utiliza toate rezistoarele ce au rezultat în urma procesului de fabricație, s-a ales o serie logaritmică de valori, astfel ca rezistoarele cu valori îndepărtate de cea dorită să se încadreze în limite acceptabile de toleranță (t) la o altă valoare standard, vecină celei dorite. Din condiția ca valoarea maximă acceptabilă a celei dorite $R_{n1}(1+t)$ să fie egală cu valoarea minimă acceptabilă a valorii standard imediat următoare $R_{n2}(1-t)$, și valoarea minimă acceptabilă a celei dorite $R_{n1}(1-t)$ să se suprapună peste valoarea maximă acceptabilă a valorii imediat inferioare $R_{n0}(1+t)$, rezultă că valorile nominale se află în progresie geometrică cu rația ,

$$(2) \quad r = \frac{1+t}{1-t}$$

$$(3) \quad \begin{cases} R_{n0}(1+t) = R_{n1}(1-t), & R_{n1}(1+t) = R_{n2}(1-t), \text{ deci} \\ R_{n2} = R_{n1} \frac{1+t}{1-t} = R_{n0} \left(\frac{1+t}{1-t}\right)^2 \end{cases}$$

Considerând intervalul primar de la 1 la 10 , deci $a_1=1$ și $a_{n+1}=10$, în acest interval vor exista $n+1$ valori nominale și $a_{n+1}=10$, și deci $r = \sqrt[n]{10}$. Prin multiplicarea cu 10^m ($m \in \mathbb{N}$) se obțin toate valorile nominale cu toleranța t , pornind de la cele $n+1$ de bază.

Astfel, pentru $t = \pm 5\%$ se obține **clasa E 24** care cuprinde un număr de 25 de valori în intervalul de bază **1 la 10**, rația progresiei fiind $r = \sqrt[24]{10}$. Întreaga clasă **E24** este compusă din valorile rotunjite ale numerelor $\sqrt[24]{10^p}$ cu $p = 0, 1, 2, \dots, 24$.

Pentru $t = \pm 10\%$ se obține **clasa E12** compusă din numerele $\sqrt[12]{10^p}$, $p = 0, 1, 2, \dots, 12$, putându-se obține și din precedentă prin omiterea alternativă a câte unui termen.

Pentru $t = \pm 20\%$ se obține **clasa E6** ($\sqrt[6]{10^p}$, $p = 0, 1, \dots, 6$) care se poate obține și din **E12** prin omiterea alternativă a câte unui termen, ($\sqrt[6]{10} = 1,468 \cong 1,5$, etc.)

1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10,0					
1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2						
1,1	1,3	1,6	2,0	2,4	3,0	3,6	4,3	5,1	6,2	7,5	9,1

- în seria de 5% intră toate numerele de pe cele 3 linii,
- în seria de 10 % sunt cuprinse numerele din primele 2 linii,
- în seria de 20% sunt cuprinse numerele din prima linie.

2. Toleranța t (%)

Este abaterea maxim admisă a valorii reale (măsurate) față de valoarea nominală marcată. Uzual, pe corpul rezistorului se marchează R_n și t în clar sau codificat. Marcarea în codul culorilor oferă avantajul citirii ușoare a valorii, în orice poziție de montare. Se mai utilizează marcarea literală.

3. Puterea disipată nominală P_n [W]

Reprezintă puterea electrică maximă ce poate fi disipată de un rezistor, în regim de funcționare îndelungată, la o temperatură ambiantă dată (frecvent 70°C), fără ca el să-și modifice caracteristicile. Stabilirea valorii P_n se face impunând ca temperatura la suprafața rezistorului să nu depășească o valoare maximă fixată. Rezistoarele la care se utilizează materiale organice (hârtie, rășini presate, și materiale plastice) au temperatura limită între 120°C și 150°C ; cele pe bază de materiale organice (ceară, sticlă, metal) pot suporta temperaturi mari (50°C și chiar 500°C).

4. Tensiunea nominală limită V_{lim} [V]

Reprezintă valoarea maximă a tensiunii continue (sau a valorii efective alternative) ce se poate aplica rezistorului, la temperatura mediului ambiant, fără a avea loc transformări ireversibile ale acestuia. Pentru un anumit tip de rezistor, există o singură valoare a rezistenței careia i se poate aplica V_{lim} în timp ce disipă P_n , numită **rezistență critică** $R_c = \frac{V_{lim}^2}{P_n}$. Pentru valorile de rezistoare mai mici decât rezistența critică, valoarea tensiunii aplicate trebuie limitată deoarece se depășește puterea disipată maximă admisă (limitare termică) iar pentru valorile rezistoarelor mai

mari decât rezistența critică se limitează tensiunea datorită pericolului de străpungere (de fapt se limitează puterea disipată pentru a nu se depăși V_{lim} de catalog).

Exemplu: pentru lucru în regim militar a unui rezistor de volum cu $R_n = 1M\Omega$ având $P_n = 0,5 W$ și $V_{lim} = 250 V$, se va limita puterea la valoarea $P_d = \frac{V_{lim}^2}{R_n}$ egală cu $(250 V)^2 / 10^6 \Omega = 1/16 W$, datorită solicitării în tensiune.

5. Tensiunea electromotoare de zgomot $E_{zg} [\mu V]$

Reprezintă rădăcina pătratică a **valorii medii pătratice** a tensiunii de zgomot ce apare la bornele rezistorului (se mai numește și **valoare medie efectivă**).

În toate rezistoarele liniare pasive există un tip de zgomot numit **zgomot termic**, determinat de agitația termică aleatoare a electronilor, și care nu depinde de prezența sau absența unui curent continuu prin rezistor, deoarece viteza termică este mult mai mare decât viteza imprimată electronilor din conductor de către câmpul electric ce acționează asupra acestora. Pentru un rezistor cu valoarea rezistenței R , aflat la temperatura absolută T , valoarea pătratică medie a tensiunii (respectiv curentului) de zgomot termic într-o bandă de frecvență Δf , este

$$(4) \quad v_1^2 = 4kTR\Delta f \quad [V^2]$$

$$(5) \quad i_2^2 = 4kT(1/R)\Delta f \quad [A^2], \text{ unde } k \text{ este constanta lui Boltzmann}$$

O valoare util de reținut este densitatea spectrală $S(f)$, $S(f) = v^2 / (\Delta f)$, pentru o rezistență de 1K la 300°:

$$S(f) = 16 \cdot 10^{-18} [V^2/Hz], \text{ respectiv valoarea medie efectivă } \sqrt{S(f)} = 4 \text{ (nV}/\sqrt{\text{Hz}}).$$

În fig. 2 se prezintă tensiunea medie efectivă de zgomot termic, pentru un rezistor, în funcție de banda în care se măsoară. Rezistoarele de volum și rezistoarele cu peliculă de carbon, parcurse de curent, prezintă și un zgomot de licărire, numit și **zgomot 1/f**, suprapus peste cel termic și asociat întotdeauna cu trecerea prin rezistor a unui curent continuu. Expresia tensiunii pătratice medii a zgomotului de licărire, pentru un rezistor de valoare R , într-o bandă de frecvență Δf , este :

$$(6) \quad v_2^2 = K_2 \cdot I^a \cdot R \cdot \Delta f \cdot (1/f) \quad [V^2],$$

unde constanta K_2 depinde de tipul rezistorului, I este valoarea intensității curentului continuu prin rezistor, a este o constantă cu valori între $0,5$ și 2 iar f este frecvența de lucru. Expresia tensiunii pătratică medii de zgomot pentru aceste rezistoare este:

(7) $v^2 = 4kTR \cdot \Delta f + (K_2 \cdot I^a \cdot R \cdot \Delta f) / f$,
cel de-al doilea termen fiind dominant până în domeniul frecvențelor ridicate.

6. Factorul de zgomot F [$\mu V/V$], este raportul dintre valoarea medie efectivă a tensiunii de zgomot de la bornele rezistorului și tensiunea continuă aplicată acestuia.

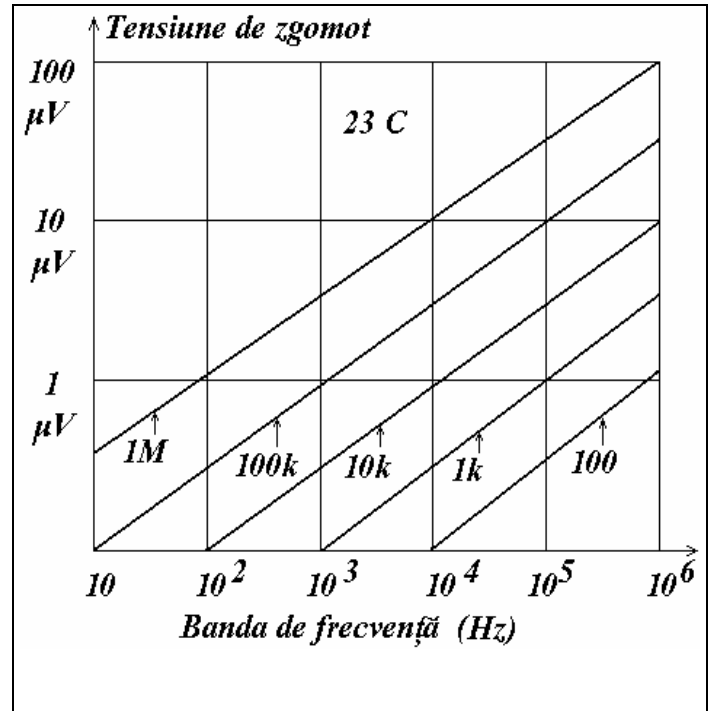


Fig.2

7. Coeficientul de variație a rezistenței cu temperatura α_R . Se definește prin relația:

$$(8) \quad \alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

Pentru variație liniară a rezistenței cu temperatura relația (8) se scrie

$$(9) \quad \alpha_R = \frac{1}{R_1} \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}$$

în care indicii notați 1 se referă la valorile nominale (date de catalog). Comportarea unui rezistor cu temperatura este dictată, în general, de comportarea materialului rezistiv care dacă este realizat din amestecuri poate avea o lege de variație nemonotonă a rezistivității. Prin alegerea cu atenție a materialului suportului izolator se poate obține o compensare termică reciprocă între suport și elementul rezistiv. În tabelul T₁ se dau comparativ valorile maxime aproximative pentru coeficienții de temperatură ai unor tipuri uzuale de rezistoare.

Tabelul T1

Tip de rezistor	Coeficient de temperatură (ppm/°C)
De volum	± 400 la 1600
Bobinat pt. aplicații generale	± 250
Bobinat de precizie	+ 20
Cu peliculă metalică Au-Pt	+ 250 la + 600
Cu peliculă metalică Ni-Cr	+ 150 la + 200
Cu peliculă din oxizi metalici	- 500 la + 500
Cu peliculă de carbon	± 500 la + 500

Obs. În realitate, variația cu temperatura nu este liniară, ci presupune și alți coeficienți β_R , γ_R , etc.

8. Rigiditatea dielectrică U_{str} [V],

Este valoarea tensiunii continue care, aplicată timp de un minut între terminalele rezistorului și corpul său, nu produce străpungeri sau alte defecte.

9. Rezistența de izolație R_{iz} [Ω]

Este raportul dintre valoarea tensiunii de izolație aplicată între terminale și corpul său și curentul rezultat (după un interval de timp și la o temperatură specificate).

10. Categoria climatică

Se indică în România printr-un grup de trei numere, de exemplu 40/200/21, cu semnificația:

- domeniul de temperatură, de la **-40°C** la **+200°C**
- numărul de zile de încercare la căldură umedă **21 zile**.

11. Stabilitatea rezistorului

Se precizează prin procentul de modificare al rezistenței în timp, în condiții de stocare sau de exploatare precizate. Stabilitatea nu trebuie confundată cu precizia.

12. Fiabilitatea rezistorului

Se determină pe baza parametrului λ , intensitate medie de defectare. Fiabilitatea este probabilitatea de bună funcționare pentru o perioadă de timp și condiții de lucru precizate. În catalog se dau intensitățile de defectare în condiții nominale de sollicitare, în realitate intensitățile de defectare fiind mult mai mici (în cazul rezistoarelor).

Tipuri de rezistoare

1. Rezistorul de volum, este realizat dintr-un amestec presat de materiale sub formă granulară: un material cu rezistivitate mică (grafit, negru de fum), un amestec de materiale de rezistivitate mare (bioxid de titan, bioxid de zirconiu, caolin, etc.) și un liant (rășină formaldehidică). Ultimele două componente cresc rezistența mecanică, modifică rezistivitatea amestecului total și îmbunătățesc stabilitatea termică și la umiditate a rezistenței. Acest tip de rezistoare se remarcă prin:

- sunt ieftine, robuste, au dimensiuni reduse însă parametrii electrici sunt puțin performanți,
- sunt utilizate în aplicații de uz general (în produse de larg consum). Au fost produse în cantități mari dar, actualmente, volumul de fabricație este neglijabil comparativ cu alte tipuri (din cauza performanțelor electrice scăzute),
- au coeficient de variație a rezistenței cu tensiunea de valoare mare (minimum 15 ppm/V). Acest efect este determinat de variația rezistenței de contact dintre granulele de carbon, efectul fiind mai accentuat la concentrații mai mici de carbon (valori mari ale rezistenței nominale) unde rezistențele de contact determină în mare măsură rezistența totală,

- au dispersie tehnologică mai mare decât a celorlalte tipuri, fapt ce determină selectarea în clase de precizie 20%, 10%, 5%,
- au stabilitatea rezistenței pe termen lung acceptabilă (5 până la 20%) pentru aplicațiile în care sunt utilizate,
- P_n poate ajunge la 2W și mai rar până la 5W,
- au schema echivalentă mai complicată datorită structurii granulare care determină rezistențe și capacități parazite suplimentare,
- pentru valori de rezistență sub 10K se comportă aproximativ ideal până la câțiva MHz după care se simte pregnant efectul capacitiv determinat de liantul dielectric dintre granule,
- efectul inductiv este neglijabil până la 100MHz,
- zgomotul de licărire are valori importante, factorul de zgomot crescând cu creșterea rezistenței (zgomotul este invers proporțional cu conținutul de carbon),
- α_R este mai mare decât la celelalte tipuri de rezistoare, dar această valoare mare se datorează parțial histerezisului termic care tinde să mascheze efectul coeficientului de temperatură,
- suportă tensiuni mai mari decât celelalte tipuri de rezistoare.

2. Rezistorul cu peliculă de carbon este realizat prin depunerea unei pelicule rezistive subțiri (cca. 0,1 μm) pe un suport dielectric cilindric, prin piroliza (descompunerea termică) unei hidrocarburi saturate (metan, benzen, heptan) în vid sau în atmosferă inertă. După depunere și uscarea se protejează pelicula cu un lac protector și apoi se ajustează tehnologic valoarea rezistenței prin filetare (spiralizare). Pentru protejarea rezistorului, corpul său se acoperă cu un lac dielectric sau cu rășini, de diverse culori. Au următoarele proprietăți:

- sunt ieftine, au dimensiuni mici, stabilitate mai bună ca a celor de volum, dar nu suportă tensiuni mari din cauza distanței mici dintre spire,
- P_n poate ajunge până la 5W. Pot fi utilizate la frecvențe mari (efectul spiralizării fiind nesemnificativ până la 50MHz),
- se fabrică curent cu precizii de 1% sau 2% în gama 5 Ω la 2M Ω și se pot obține în tehnologii mai pretențioase precizii de 0,1%,
- în România sunt codificate RCG (rezistoare cu peliculă de carbon de uz general) și se fabrică în toleranțe $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$ (J), $\pm 10\%$ (K), $\pm 20\%$ (M) și puteri nominale de 0,25W, 0,5W, 1W, 2W.

3. Rezistorul bobinat se obține prin înfășurarea unui conductor de rezistivitate mare (constantan, kanthal, nickrothal, manganină, crom-nichel) pe un suport izolator (fibră de sticlă sau ceramică). Rezistorul este protejat prin lăcuire ($\theta < 125^\circ\text{C}$), vitrificare ($\theta = 275^\circ - 400^\circ\text{C}$) sau prin tropicalizare,

- au rezistența nominală cuprinsă între 0,1 Ω și sute k Ω ,
- se pot obține uzual cu toleranțe de $\pm 0,25\%$. Îngrijit se obțin și toleranțe de 0,01%. Toleranța scade în timp, cu 0.003% pe an în regim de solicitare ușoară și scade puternic la solicitare termică ridicată,

- prin bobinare anti-inductivă se reduce inductivitatea parazită însă la frecvențe mari efectul capacitiv, determinat de suport și de dielectricii de protecție, devine deranjant,

- au stabilitatea de 1% la 2% și acoperă o gamă de puteri de la 1W la 500W, în timpul funcționării corpul acestor rezistoare putând atinge temperaturi de sute de grade Celsius. În tabelul T2 se prezintă câțiva parametri ai unor materiale utilizate la fabricarea rezistoarelor bobinate.

Tabelul T2

	Crom-Nichel Ni=80% Cr=20%	Manganin Ni=4% Cu=84% Mn=12%	Constantan Ni=45% Cu=55%	Kanthal Fe=75% Cr=20% Al=4,5% Co=0,5%	Nikrothal Ni=75% Cr=17% Mn=8%
ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	1,15	0,42	0,5	1,35	1,33
α [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]	130	± 15	± 20	± 20	± 20
θ_{max} [$^{\circ}\text{C}$]	1000	100	535	150	230
U_{tc} [$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$]	0,3	2	43	3,5	2
D [g/ cm^3]	8,4	8,4	8,9	7,2	8,1

unde θ_{max} este temperatura maximă de utilizare, U_{tc} este tensiunea electromotoare de contact la cupru iar d este densitatea. Rezistoarele de putere de producție autohtonă se fabrică din Cr-Ni sau Cu-Ni.

4. Rezistorul cu peliculă metalică se realizează prin depunerea unei pelicule de metal, aliaj metalic, oxizi metalici sau cermeturi (amestec din metale și materiale de mare rezistivitate) pe un suport izolator din sticlă sau ceramică (în cazul peliculelor subțiri) și alumină în cazul peliculelor groase. Cele mai utilizate materiale pentru pelicule sunt: - nichelul pentru rezistențe mici, Ni-Cr, Ni-Cu, oxizi metalici (bioxidul de staniu sau cloruri ale staniului) pentru rezistențe de valori medii și cermeturi pentru rezistențe de valori mari. Suportul cilindric poate fi cilindric (permite operația de spiralizare pentru ajustarea valorii rezistenței) sau plat (ajustarea valorii se face prin decupare cu laser),

- au coeficient de temperatură scăzut,
- stabilitate foarte bună ($< 0,5\%$),
- P_n este de maximum 5W pentru tipul cu peliculă metalică și maximum 10W pentru cele din oxizi metalici,
- toleranța minimă este de 0,1%,
- coeficient redus de variație a rezistenței cu tensiunea ($0,05 \cdot 10^{-6}/\text{V}$).

În România se fabrică două tipuri de rezistoare cu peliculă metalică: tip 2 cu peliculă de nichel depusă pe suport cilindric pentru valori mici ale rezistenței nominale (1Ω la 330Ω și codificate RMG) și tip 1 din oxizi metalici (sau aliaj metalic) depuși pe suport plan din alumină. Acestea sunt codificate RPM (rezistoare cu peliculă metalică

de uz profesional), se fabrica pentru gama de valori nominale de la 10Ω la $2M\Omega$ și se găsesc uzual în toleranțele $\pm 0.25\%$ (c), $\pm 0,5\%$ (d), $\pm 1\%$ (f), $\pm 2\%$ (g), $\pm 5\%$ (J) și puterile nominale 0,125W, 0,25W, 0,5W, 1W. Aceste rezistoare, RPM, sunt acoperite pentru protecție cu o rășină termodură.

Atenție: in cea ce privește rezistoarele cu peliculă metalică fabricate in România trebuie reținute diferențele dintre cele două categorii existente:

- Rezistoare cu peliculă metalică de tip 2 sau de uz general, care se codifică RMG, se fabrică în domeniul de valori de la 1Ω la 330Ω și al căror aspect exterior este identic cu al rezistoarelor cu peliculă de carbon (RCG),
- Rezistoare cu peliculă metalică de tip 1 sau de uz profesional, care se codifică RPM, se fabrică pentru toata gama de valori uzuale și care se prezintă sub forma de plachetă, asemănător unor tipuri de condensatoare ceramice.

5. Rezistorul termotropic este un rezistor realizat dintr-un complex de materiale care asigură proprietatea de autocorecție a stabilității termice. Modificarea temperaturii determină modificarea rezistenței față de valoarea dorită; în momentul când devierea valorii atinge o valoare limită, mecanismul de autocorecție determină inversarea sensului de variație (a semnelui coeficientului de temperatură) în vederea restabilirii valorii dorite. Deci modificarea în continuare a temperaturii, care la rezistoarele obișnuite determină variația rezistenței, va determina în cazul rezistorului termotropic activarea mecanismului de autocorecție a valorii rezistenței. În fig. 3 se prezintă comparativ graficul de variație al rezistenței cu temperatura pentru:

- rezistor convențional de precizie,
- rezistor standard Vishay,
- rezistor termotropic Vishay.

Încă din anul 1981 firma Vishay avea disponibile două tipuri de rezistoare termotropice, unul axat pe dreapta orizontală (ca în fig. 3) și altul cu panta de $\pm 1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ (panta dreptei de referință putând fi executată la comanda utilizatorului). Neliniaritatea maximă, în toată gama de temperatură, este de 30ppm și este atinsă în vecinătatea temperaturilor 25°C , 60°C , 100°C .

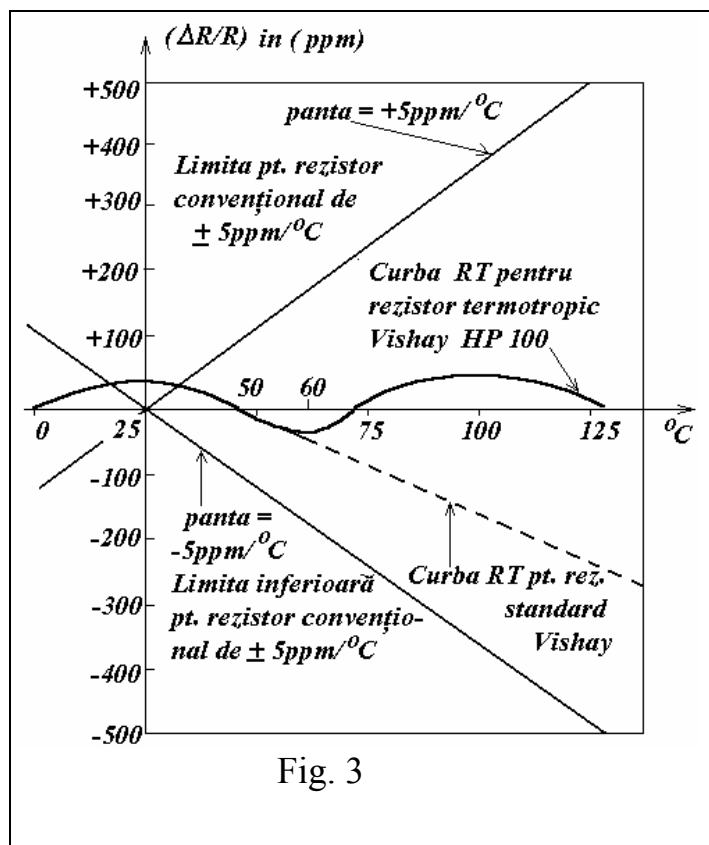


Fig. 3

Rețele rezistive. În prezent mai mult de jumătate din rezistoarele fixe, liniare, se fabrică sub formă de rețele rezistive. Acestea constau dintr-o structură de rezistoare, de

valori egale sau nu, independente sau interconectate (după necesitățile utilizatorului) și încapsulate împreună. Rețelele rezistive se fabrică:

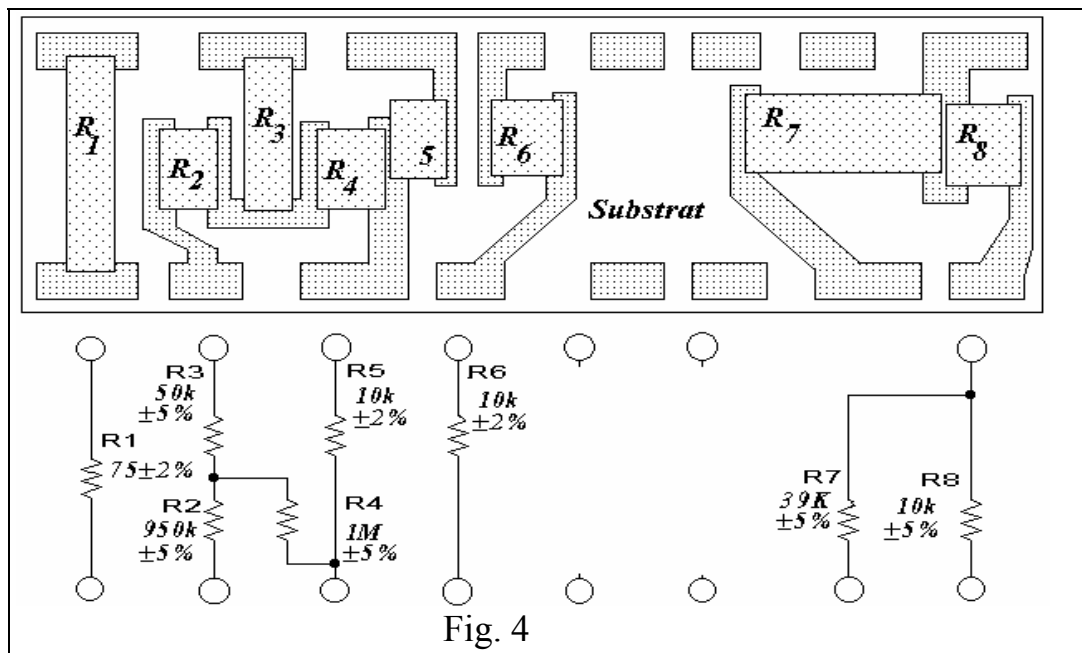
- în tehnologia straturilor subțiri,
- în tehnologia straturilor groase (peste 90%),
- cu folie metalică.

a. Se realizează prin depunerea prin evaporare sau implantare ionică a unei pelicule subțiri ($<1\mu\text{m}$) metalice (aliaj Ni-Cr, nitrură de tantal) pe un suport de sticlă sau ceramică. Pentru desenul traseelor conductoare (depunere de aur) și a celor rezistive se utilizează tehnici fotolitografice. Rețelele rezistive se ermetizează în capsule asemănătoare celor utilizate pentru circuite integrate. Aceste rețele se recomandă acolo unde primează cerințe de precizie și stabilitate (de exemplu în cazul conversiei analog digitale).

Tipul a. este caracterizat de:

- toleranțe între $\pm 0,01\%$ până la $\pm 2\%$ pentru valori de rezistență de la 1Ω la $10\text{M}\Omega$,
 - dimensiuni reduse, împerechere mai bună de $0,005\%$ și coeficient de temperatură între $\pm 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ și $\pm 25\text{ppm}/^\circ\text{C}$, pentru temperaturi între 0°C și 60°C ,
 - coeficient de variație a rezistenței cu tensiunea de la $0,1\text{ppm}/\text{V}$ la $0,5\text{ppm}/\text{V}$.
- Pentru straturi foarte subțiri (unimoleculare) acest parametru devine extrem de mare.
- puterea disipată de numai $0,25\text{W}$ pe întreaga capsulă (mai puțin de 50mW pe fiecare element) este un handicap serios .

b. Se realizează prin depunerea pe o placă de bază (substrat ceramic constituit



din

alumină 96%) a unei pelicule de pastă rezistivă (amestec de metale și un liant pe bază de sticlă) prin tehnologii serigrafice. După tratamente termice, se acoperă elementul rezistiv cu o glazură care asigură protecție antihigroscopică și rigidizare mecanică.

Valoarea rezistenței unui rezistor al rețelei este dictată de grosimea și rezistivitatea pastei rezistive și de geometria rezistorului. Aceste rețele sunt caracterizate de;

- toleranță tipică individuală de $\pm 5\%$ pentru valori între $100\text{K}\Omega$ și $500\text{M}\Omega$.

Toleranța scade la scăderii valorii rezistenței (până la $0,1\%$ pentru valori sub $1\text{K}\Omega$),

- împerecherea tipică este de $\pm 2\%$ (mai rar de $\pm 0,1\%$),
- coeficient de temperatură tipic $100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ (mai rar $50\text{ppm}/^\circ\text{C}$),
- coeficientul de variație cu tensiunea tipic $50\text{ppm}/\text{V}$,
- se utilizează cu precădere în aplicații numerice.

c. Sunt realizate prin lipirea cu un adeziv, pe un substrat din alumina, a unei folii rezistive (din aliaj Cr-Ni de grosime cca 25000°A). Extremitățile elementului rezistiv sunt conectate prin fire foarte subțiri în configurația dorită sau la terminalele de ieșire din capsulă. Structura este de asemenea ermetizată prin încapsulare. În capsulă există azot sub formă de gaz uscat. Aliajul, substratul și adezivul sunt alese cu grijă pentru a se obține autocorecția variației rezistenței cu temperatura. Valorile individuale de rezistență au o abatere cu temperatura între $1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ și $10\text{ppm}/^\circ\text{C}$. Stabilitatea în timp este remarcabilă ca și fiabilitatea însă evident sunt mult mai scumpe decât celelalte tipuri.

Modul de lucru

1. Se identifică rezistoarele de pe suportul pe care sunt fixate și se notează codul de catalog împreună cu toți parametrii specificați în catalog, conform tabelului T_1 .

Tabelul T_1

R	Cod	Valoare nominală	Toleranța %	Puterea W	Factor de Zgomot	Categorie climatică	Valoare reală (măsurată)
R_1							
R_2							
R_3							
....							

Obs. Deoarece la pct.2 se vor face măsurători cu rezistoarele introduse în cuva de încălzire, unde nu vor mai fi vizibile, se va lua un punct de referință pentru numărare pe partea opusă componentelor.

2. Se determină caracteristica $R(\theta)$ pentru rezistoarele identificate la 1. Pentru aceasta se utilizează dispozitivul de încălzire a rezistoarelor și se măsoară valorile de rezistență la diverse temperaturi cuprinse între temperatura mediului ambiant și valoarea maximă precizată în categoria climatică cea mai slabă. Se completează în timpul măsurătorilor tabelul T_2 .

Tabelul T_2

$\theta [^\circ\text{C}]$	θ_{amb}	30	40	50	80	90
R1							

R2							
.....							

3. Se desenează graficele $R_i(\theta)$; $i=1..10$, pe hârtie milimetrică, ținând cont de variația neliniară cu temperatura (trasare cu mâna).

4. Se calculează, folosind rezultatele consemnate în T_2 , coeficientul de temperatură al rezistenței pe intervale de temperatură în ipoteza că în intervalele considerate variația rezistenței cu temperatura este liniară. Se folosește pentru calcul relația $\alpha_R = \frac{1}{\sqrt{r_1 \cdot r_2}} \frac{r_2 - r_1}{\theta_2 - \theta_1}$; $r_1 = R_k(\theta_1)$, $r_2 = R_k(\theta_2)$, cu θ_1, θ_2 temperaturi consecutive.

$k = 1..10$ iar $\Delta\theta$ (variația de temperatură) să nu depășească 10°C (deci atenție la distanța dintre temperaturile de măsură) . Se completează tabelul T_3 .

Tabelul T_3

$\Delta\theta [^\circ\text{C}]$	20 - 30	80 - 90
$\alpha_{R1} [\text{ppm}/^\circ\text{C}]$				
$\alpha_{R2} [\text{ppm}/^\circ\text{C}]$				
.....				

5. Se calculează, cu valorile cele mai dezavantajoase din T_3 , valoarea rezistenței fiecărui rezistor testat la temperaturile extreme ale categoriei climatice.

6. Se determină comportarea rezistorului la frecvențe ridicate. Se folosește, pentru aceasta, un Q-metru cu frecvența variabilă între 50KHz și 50MHz. Se fixează frecvența de lucru a Q-metrului (la o valoare din intervalul în care lucrează bobina auxiliară), se montează la bornele notate L_x bobina auxiliară corespunzătoare și se modifică valoarea condensatorului variabil al Q-metrului până ce se obține rezonanță (deviație maximă a acului indicator). Se notează valorile C_1 respectiv Q_1 (fără rezistor în circuit). Se calculează rezistența serie echivalentă pierderilor în circuitul rezonant paralel folosind

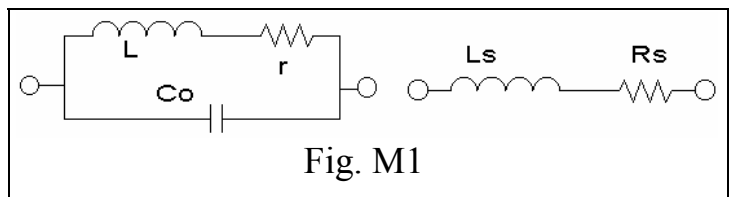


Fig. M1

formula $R_s = \frac{1}{\omega C Q_s}$, $Q_s = Q_1$, $C = C_1$, având în vedere fig. M1

6. 1 Dacă rezistorul de testat are $R > R_s$ (aproape sigur) atunci se va conecta rezistorul la bornele C_x , fig. M2, și se va realiza din nou rezonanța modificând ușor valoarea capacității condensatorului variabil (nu se modifică frecvența fixată anterior). Se citește la rezonanță

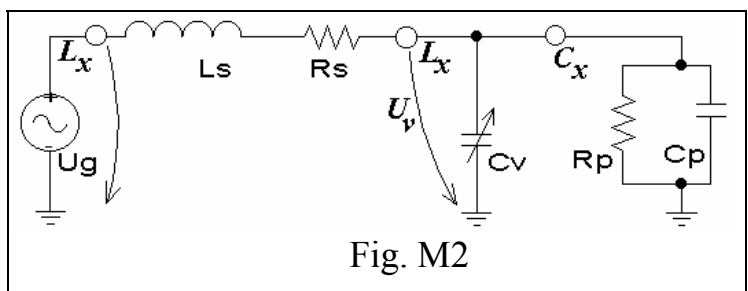


Fig. M2

C_2 și Q_2 . Dacă $C_1 > C_2$ atunci rezistorul se comportă **capacitiv** la frecvența de test și are

