

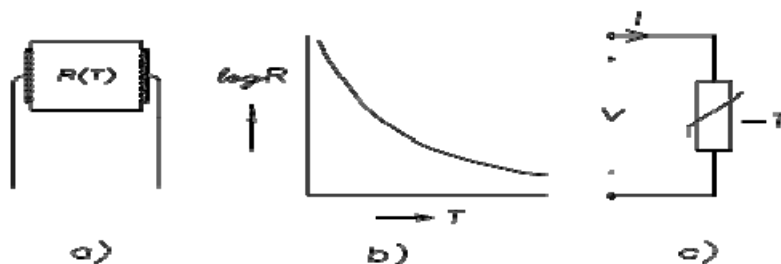
3 NELINEARNI UPORI

- 3.1 NTC TERMISTORJI
- 3.2 PTC TERMISTORJI
- 3.3 VARISTORJI

3.1 NTC TERMISTORJI

3.1.1 UVOD

NTC termistorji so temperaturno odvisni upori z visokim negativnim temperaturnim koeficientom (NTC) upornosti, tipično $-1 \div -7\% /K$! Strukturo, karakteristiko in električni simbol NTC termistorja prikazuje Sl 3.1.



SI 3.1 Struktura (a), karakteristika (b) in električni simbol (c) NTC termistorja

Materiali, ki se uporabljajo za izdelavo NTC termistorjev, so po svoji sestavi zmesi kovinskih oksidov, torej dobri izolatorji, ki jih z dodatkom ustreznih atomov primesi lahko pretvorimo v polprevodniške keramike.

Tehnologija izdelave je zato podobna kot pri keramiki: zmes kovinskih oksidov se dobro premeša, doda primerne atome primesi in vezivo, nastalo pasto oblikuje s pomočjo kalupov v zahtevane oblike in žge (sintra) pri visoki temperaturi. Kontakti so izdelani z nanašanjem prevodne metalne plasti. Običajno sledi še pospešeno staranje, ker imajo v začetnem obdobju termistorji velike variacije lastnosti, poleg tega pa na ta način slabi elementi izpadejo.

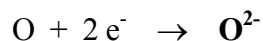
3.1.2 POLPREVODNIŠKA KERAMIKA

Uvod

Polprevodniška keramika je osnova za mnoge moderne elektronske elemente. Narejena je na osnovi kovinskih oksidov.

Kovinski oksidi so v splošnem dobri izolatorji, ki pa jih lahko z dodatkom ustreznih atomov primesi pretvorimo v polprevodniške keramike. Pogoji za to so atomi, ki se lahko nahajajo v različnih ionskih stanjih oz. radi sprejemajo ali oddajajo elektrone. V spodnjih primerih zaželeno stanje zapišemo poudarjeno (bold).

Primer: Atom kisika O rad sprejme 2 elektrona e^- in je rad oz. je energijsko ugodneje, če se nahaja v stanju 2x negativno nabit ion. To opišemo z naslednjo enačbo



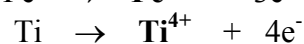
Pripravimo še nekaj primerov, ki jih bomo rabili kasneje pri razlagi polprevodniške keramike:

N-tip keramike:

osnovni material je železo Fe z lastnostjo:



donorska primes je titan Ti z lastnostjo:



P-tip keramike:

osnovni material je nikelj Ni z lastnostjo:



akceptorska primes je litij Li z lastnostjo:



a) Nastanek polprevodniške keramike N-tipa

Poglejmo si keramiko na osnovi železovega oksida Fe_2O_3 . Osnovna molekula Fe_2O_3 je navzven neutralna, znotraj posamezne molekule pa so trije atomi kisika ugrabili šest elektronov dvema atomoma čeleza ($\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3^{2-}$) in jih vezali nase. Zato je material brez prostih nosilcev, torej izolator. Če pa pred sintranjem dodamo primesi titana, ki oddaja štiri elektrone



bo atom Ti tri elektrone porabil podobno kot železo, četrti elektron pa bo ostal nevezan oz. skoraj prost!

Pri nizkih temperaturah, ko so termične energije še nizke, so ti četrti elektroni še vezani in material bo izolator. Pri višjih temperaturah dobijo ti četrti elektroni dovolj energije, da se odtrgajo od matične molekule in prispevajo k prevajanju toka, material je tedaj prevodnik.

Z naraščajočo temperaturo torej število prostih nosilcev narašča, zato ohmska upornost materiala upada - nastala je torej polprevodniška keramika N-tipa (nosilci - elektroni) z negativnim temperaturnim koeficientom (NTC)!

b) Nastanek polprevodniške keramike P-tipa

V tem primeru je osnovna molekula npr. nikljev oksid, v kateri je prišlo do izmenjave dveh elektronov ($\text{Ni}^{2+}\text{O}^{2-}$) in material je izolator. Če pa pred sintranjem dodamo primesi litija, ki oddaja en elektron manj



se bodo po vgraditvi pojavila z elektroni nazasedena mesta, ki lahko pri višjih temperaturah sprejemajo iz soseščine vezane elektrone in s tem povzročijo pod vplivom pritisnjeneja polja nastanek toka (pozitivne vrzeli).

Z naraščajočo temperaturo število prostih nosilcev narašča, zato ohmska upornost materiala upada - nastala je torej polprevodniška keramika P-tipa (nosilci - vrzeli) z negativnim temperaturnim koeficientom (NTC)!

3.1.3 TEMPERATURNA ODVISNOST UPORNOSTI

Podobno kot v polprevodnikih tudi v polprevodniški keramiki koncentracija prostih nosilcev eksponencialno narašča s temperaturo, npr. v keramiki N-tipa

$$n(T) = n_{\infty} e^{\frac{\Delta E}{kT}} \quad \text{Equation Section 3(3.1)}$$

kjer je ΔE ... aktivacijska energija, določena z vezalno energijo elektronov

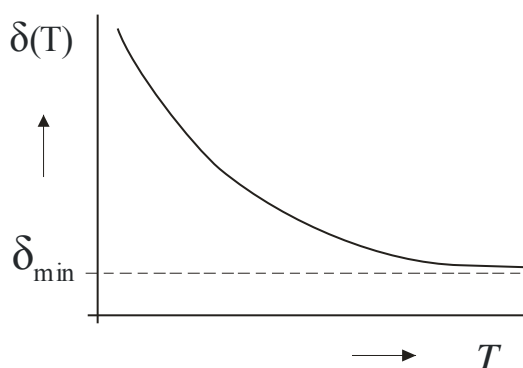
kT ... termična energija (T-absolutna temperatura [K])

n_{∞} ... limitna (maksimalna) koncentracija prostih elektronov za visoke temperature, določena s koncentracijo dodanih primesi (vsi ionizirani!)

Temperaturna odvisnost specifične upornosti materiala je zaradi recipročne zveze med ρ in n podana z izrazom

$$\rho(T) = \frac{1}{q \mu_n n(T)} = \rho_{\min} e^{\frac{\Delta E}{kT}} \quad (3.2)$$

kjer je $\rho_{\min} = 1/q\mu_n n_{\infty}$ minimalna upornost materiala za visoke temperature (SI 3.2).



SI 3.2 Odvisnost specifične upornosti materiala od temperature

Temperaturna odvisnost upornosti NTC termistorja enostavne geometrije (konstantni presek S , dolžina l) je torej

$$R(T) = \rho \frac{l}{S} = R_{\min} e^{\frac{\Delta E}{kT}} \quad (3.3)$$

kjer je $R_{\min} = \rho_{\min} l/S$ minimalna upornost termistorja pri visokih temperaturah.

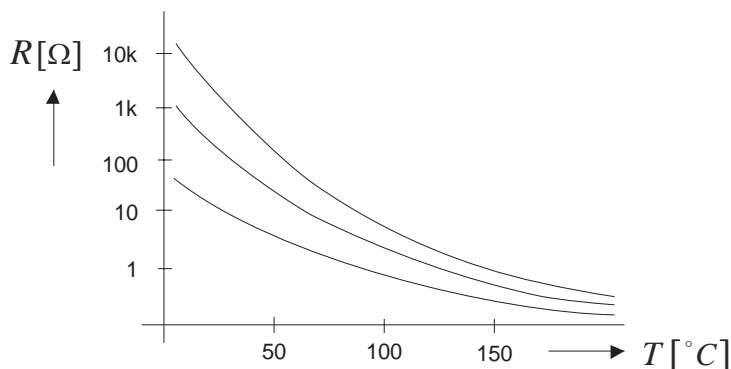
Proizvajalci gornjo temperaturno odvisnost upornosti NTC termistorja običajno podajajo z dvema konstantama A , B v obliki

$$R(T) = A e^{\frac{B}{T}} \quad (3.4)$$

Primerjava enačb (3.3) in (3.4) pokaže, da je konstanta A določena z minimalno upornostjo termistorja za visoke temperature R_{\min} oz. geometrijo in koncentracijo dodanih primesi.

Konstanta B je določena z vezalno energijo prostih nosilcev oz. z lastnostmi osnovnega materiala in ji zato pravijo tudi materialna konstanta (material constant), včasih pa kratko faktor B. Tipične vrednosti konstante B se nahajajo v intervalu $2000\text{K} \div 5000\text{K}$.

Tipično odvisnost upornosti družine NTC termistorjev od temperature prikazuje Sl 3.3. Zaradi velikih sprememb upornosti in razlik med posameznimi termistorji družine je graf običajno podan v semilog merilu.



Sl 3.3 Odvisnost upornosti družine NTC termistorjev od temperature

Materialna konstanta B

Pogosto proizvajalci podajajo materialno konstanto B posredno preko izmerjenih upornosti NTC termistorja pri dveh temperaturah, npr. $R_1(T_1=25^\circ\text{C})$, kar se imenuje tudi **nazivna upornost** termistorja R_n in $R_2(T_2=85^\circ\text{C})$. Če vstavimo ti dve točki v en(3.4) in delimo, je B določen kot

$$B = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (3.5)$$

Temperaturni koeficient upornosti NTC termistorja

Temperaturni koeficient upornosti NTC termistorja najenostavneje izračunamo z logaritmiranjem in odvajanjem en(3.4)

$$TK_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{d \ln R}{dT} = - \frac{B}{T^2} \quad (3.6)$$

Primer: Izračunaj TK_R za NTC termistor z $B=3600\text{K}$, pri sobni temperaturi !

Rešitev: (pozor, nastopajo absolutne temperature in je potrebno $^\circ\text{C}$ pretvoriti v K !)

$$TK_R = - \frac{B}{T^2} = - \frac{3600 \text{ K}}{(300 \text{ K})^2} = - \frac{4 \%}{\text{K}} \quad (3.7)$$

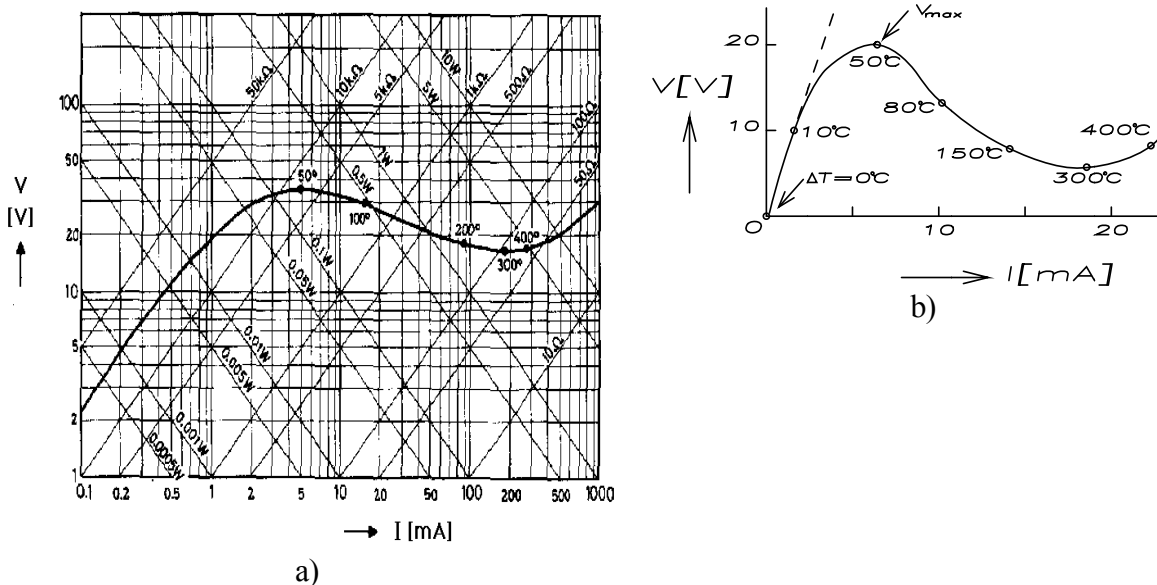
3.1.4 STACIONARNA KARAKTERISTIKA NTC TREMISTORJA

Stacionarna $V(I)$ karakteristika podaja zvezo med napetostjo in tokom na NTC termistorju.

V tem redkem primeru $V(I)$ karakteristike je kot neodvisna spremenljivka izbran tok I , ki se enolično spreminja, za razliko od napetosti, ki v tem primeru ni enolična spremenljivka.

Stacionarno karakteristiko dobimo, če nastavimo tok in nato počakamo z meritvijo napetosti dovolj dolgo, da se razmere stabilizirajo oz. se temperatura in napetost na elementu ne spreminjata več.

Sl 3.4a prikazuje stacionarno $V(I)$ karakteristiko v linearnem merilu. V bližini izhodišča, pri majhnih tokih, je zveza linearna, ker so tedaj moči segrevanja ($P=VI$) še nizke, temperatura se zato še ne spreminja in NTC se obnaša kot običajen ohmski upor. Pri višjih tokih in napetostih začne temperatura naraščati, upornost NTC naglo upada in zato navzlic naraščajočemu toku upada tudi napetost na elementu, dobimo področje negativne diferencialne upornosti. Često podajajo proizvajalci na $I(V)$ krivulji kot parameter pripadajoče povišanje temperature elementa, nad sobno temperaturo. Pri visokih temperaturah na elemntu okrog 300°C začne upornost ponovno naraščati, zaradi upadanja gibljivosti nosilcev.



Sl 3.4 Stacionarna $V(I)$ karakteristika NTC termistorja v linearnem (a) in log-log merilu (b)

Včasih proizvajalci podajajo stacionarno $V(I)$ karakteristiko v log-log diagramu (Sl 3.4b). Na ta način lahko pokrijejo širše področje tokov in napetosti, kar omogoči vnos podatkov za celo družino NTC termistorjev. Naslednja prednost tega diagrama pa je, da so črte, ki povezujejo točke konstantnega VI produkta in konstantnega V/I razmerja, torej krivulje konstantne moči in konstantne upornosti, v log-log $V(I)$ diagramu premice! Tako lahko za vsako delovno točko direktno odčitamo iz diagrama moč na elementu in njegovo upornost (Sl 3.4b).

Primer: Oцени moč in upornost na NTC termistorju za delovno točko D ($V = 30V$, $I = 3mA$) v diagramu na sl.4b !

Rešitev: Iz diagrama odčitamo s pomočjo premic moči in upornosti, ki potekata skozi izbrano delovno točko D

$$P = 0.1W$$

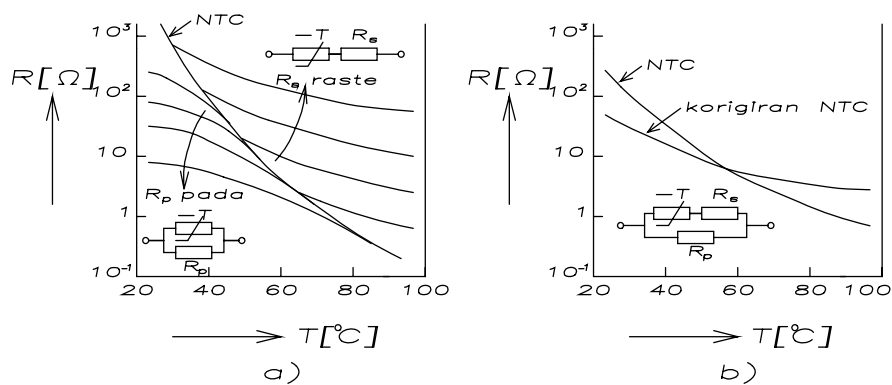
$$R = 10k\Omega$$

O pravilnosti odčitanih vrednosti se lahko prepričamo še z enostavnim izračunom, s pomočjo podanih vrednosti napetosti in toka.

3.1.5 DORAVNAVANJE KARAKTERISTIKE

Kadar za dano aplikacijo originalna $R(T)$ karakteristika danega NTC termistorja ne ustreza, lahko v določenih mejah to odvisnost sami doravnavamo (trimamo), z dodatkom običajnih ohmskih uporov, ki imajo zanemarljiv TK_R v primerjavi s termistorji.

Upor lahko dodamo k NTC termistorju vezan v serijo ali paralelno, kot prikazuje Sl 3.5a. Včasih dodamo oba upora, serijsko in paralelno (Sl 3.5b). V vsakem primeru so spremembe $R(T)$ karakteristike take, da se odvisnost upornosti od temperature zmanjša oz. so v smeri zmanjševanja temperaturnega koeficienta upornosti danega NTC termistorja.



SI 3.5 Doravnavanje $R(T)$ karakteristike NTC termistorja z dodatkom uporov

3.1.6 TERMOELEKTRIČNE ZNAČILNOSTI

NTC termistorji so termoelektrični elementi: vsem aplikacijam teh elementov je skupno, da izkoriščajo opisano $R(T)$ odvisnost oz. natančneje, kdaj in kako doseže v konkretnem primeru dani NTC termistor predpisano temperaturo in s tem upornost. Oglejmo si nekaj tipičnih primerov!

1. Stacionarno stanje : $T = \text{const}$

V tem primeru se je torej stanje na elementu že uravnovesilo (stacioniralo), zato se nobena količina s časom ne spreminja več. Za dano moč na NTC termistorju ($P = VI$) se njegova temperatura stabilizira, podobno kot je bilo opisano pri segrevanju uporov, v skladu z enačbo

$$P = VI = K(T - T_a) \quad (3.8)$$

kjer so T, T_a ... temperature NTC termistorja, ambienta
 K ... termična prevodnost NTC termistorja

Termična prevodnost K [$W/^\circ C$] je recipročna vrednost termične upornosti R_{th} in znaša pri NTC termistorjih tipično $1 \div 10$ $mW/^\circ C$. Termična upornost predstavlja številčno tisto moč, ki dvigne, v skladu z gornjo enačbo, temperaturo elementa za $\Delta T = 1^\circ C$, ali obratno kot tisto moč, ki jo element oddaja pri temperaturni razliki $\Delta T = 1^\circ C$. Zato srečamo za parameter K včasih v priročnikih tudi ime faktor disipacije.

Pogosto srečamo v praksi obrnjen primer - zanima nas, kakšna je temperatura T , ki jo ima element pri dani obremenitvi P in temperaturi ambienta T_a . Rezultat dobimo enostavno z obratom gornje enačbe

$$T = T_a + \frac{P}{K} \quad (3.9)$$

Delovanje elementa pri ničelni moči.

V zvezi s tem omenimo še delovanje elementa pri ničelni moči. Pogosto srečamo pri aplikacijah NTC termistorjev, npr. kadar deluje NTC kot senzor temperature, zahtevo, da naj tok skozi NTC oz. lastno segrevanje ne prispeva k povišanju temperature elementa oz. natančneje : povišanje temperature elementa zaradi lastnega segrevanja naj bo manjše od neke predpisane ΔT_0 (tipično $\Delta T_0 = 0.1^\circ C$). Ustrezni moči pravimo ničelna moč P_0 in jo lahko za dani element izračunamo s pomočjo gornje enačbe

$$P_0 = K \Delta T_0 \quad (3.10)$$

Primer: Določi za NTC termistor s termično prevodnostjo $K = 10 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ ničelno moč P_0 , če je predpisano ničelno povišanje temperature $\Delta T_0 = 0.1^\circ\text{C}$!

Rešitev: V skladu z gornjo enačbo pišemo

$$P_0 = K \Delta T_0 = 10 \text{ mW}/^\circ\text{C} \cdot 0.1^\circ\text{C} = \underline{1 \text{ mW}} \quad (3.11)$$

2. Prehodni pojavi : $T = T(t)$

V tem primeru je stanje nestacionarno, temperatura in ostale količine se s časom spreminjajo. Pogledali si bomo dva tipična prehodna pojava, ohlajanje in segrevanje NTC termistorja.

Ohlajanje NTC termistorja :

Opazujemo npr. nek NTC termistor, ki mu v trenutku $t = 0$ izklopimo tok oz. segrevanje (Sl 3.6a). Enačbo za časovni potek upadanja temperature elementa dobimo iz izenačenja oddane energije v nekem kratkem času dt , ki jo izračunamo po gornji enačbi, z ustreznim zmanjšanjem toplotne energije elementa, kar je opisano s toplotno kapaciteto elementa H in zmanjšanjem njegove temperature $T(t) - T_a$

$$P(t) dt = K [T(t) - T_a] dt = - H dT \quad (3.12)$$

Toplotna kapaciteta NTC termistorja H podaja toploto, ki jo mora element sprejeti ali oddati za spremembo temperature elementa $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ in znaša pri teh elementih tipično $0.1 \text{ Ws}/^\circ\text{C}$. Časovni potek temperature $T(t)$ dobimo s separacijo spremenljivk v en(3.12) in integracijo od 0 do t

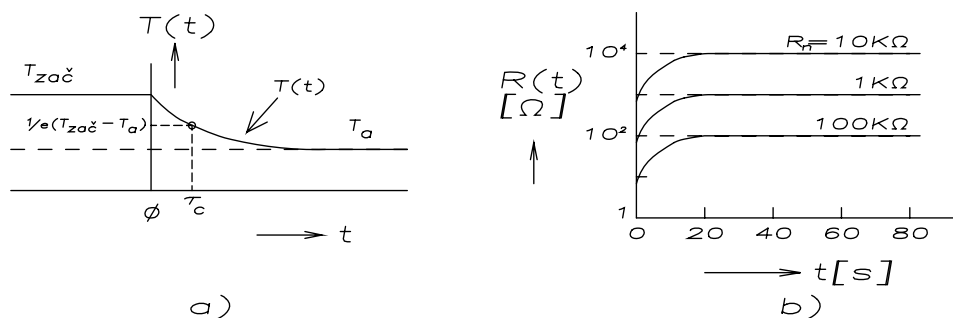
$$\int_{T_{zac}}^{T(t)} \frac{dT}{T - T_a} = - \frac{K}{H} \int_0^t dt \quad (3.13)$$

Rešitev gornjih integralov vodi do časovnega poteka temperature pri ohlajanju $T(t)$

$$T(t) - T_a = (T_{zac} - T_a) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (3.14)$$

Začetni presežek temperature $(T_{zac} - T_a)$ torej eksponencialno upada s časom proti 0. Časovna konstanta tega upadanja, določena z razmerjem H/K , nosi običajno ime časovna konstanta ohlajanja (cooling) τ_c (tipično $1\text{s} \div 1\text{min}$). Časovno konstanto si lahko predstavljamo tudi kot čas, v katerem začetni presežek temperature upade za faktor $1/e$.

Včasih tovarne namesto časovne konstante ohlajanja τ_c podajajo časovni potek naraščanja upornosti NTC termistorja pri nekem standardnem ohlajanju, npr.: $T_{zac} = 85^\circ\text{C}$, sledi ohlajanje v zraku. Ustrezní časovni potek naraščanja upornosti proti nazivni upornosti R_n termistorja zaradi ohlajanja prikazuje Sl 3.6b.



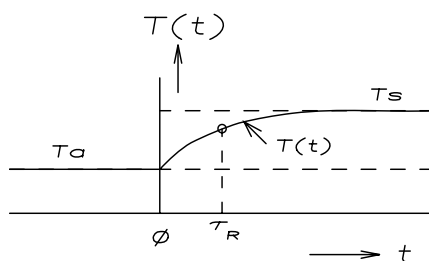
SI 3.6 Upadanje temperature(a) in naraščanje upornosti(b) pri ohlajanju NTC termistorja

Segrevanje NTC termistorja :

Proces segrevanja NTC termistorja proizvajalci podajajo običajno na sledeč način (SI 3.7): na začetku ($t < 0$) segrevanja ni, element ima kar temperaturo ambienta, običajno $T_a = 25^\circ\text{C}$. Segrevanje se prične v trenutku $t = 0$ s tem, da element potopimo npr. v silikonsko olje pri določeni stacionarni temperaturi, običajna standardno dogovorjena vrednost je $T_s = 85^\circ\text{C}$. S podobno analizo kot v prejšnjem primeru bi lahko ugotovili, da tudi sedaj začetno odstopanje temperature od ravnovesne vrednosti $T_s - T_a$ eksponencialno upada proti 0 oz. trenutna temperatura $T(t)$ proti ravnovesni vrednosti T_s , v skladu z enačbo

$$T(t) - T_a = (T_s - T_a)(1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}}) \quad (3.15)$$

Pri segrevanju se pojavi časovna konstanta segrevanja, včasih jo imenujejo tudi odzivni čas NTC termistorja (Response Time) τ_R , ki je pri teh elementih tipično $1\text{s} \div 1\text{min}$ in si jo lahko predstavljamo tudi kot čas, v katerem začetno odstopanje temperature upade za faktor $1/e$.



SI 3.7 Segrevanje NTC termistorja

3.1.7 OSNOVNI PODATKI

Poleg nekaterih podatkov, ki so bili že opisani pri dosedanji obravnavi ohmskih uporov in NTC termistorjev, podajajo proizvajalci NTC termistorjev še nekatere podatke:

- Nazivna upornost NTC termistorja R_n je ohmska upornost elementa pri sobni temperaturi ($T_a = 25^\circ\text{C}$). Tipične vrednosti nazivnih upornosti : $R_n = 5\Omega \div 1\text{M}\Omega$.

- Tolerance nazivne upornosti : 20% 10% (rel. grobo !)
- Nazivna moč P_n je tista maksimalna moč termistorja, ki jo element še trajno prenese brez degradacije. Tipične vrednosti nazivnih moči: $P_n = 0.1W \div 1W$ / pri $T_a = 55^\circ C$ /
- Temperaturno področje delovanja je običajno podano za dva načina obremenitve:
 - delovanje pri nazivni moči P_n : $T_a = -55^\circ C \div +55^\circ C$
 - delovanje pri ničelni moči P_0 : $T_a = -55^\circ C \div +1200^\circ C$

3.1.8 INDIREKTNO SEGREVANI TERMISTORJI

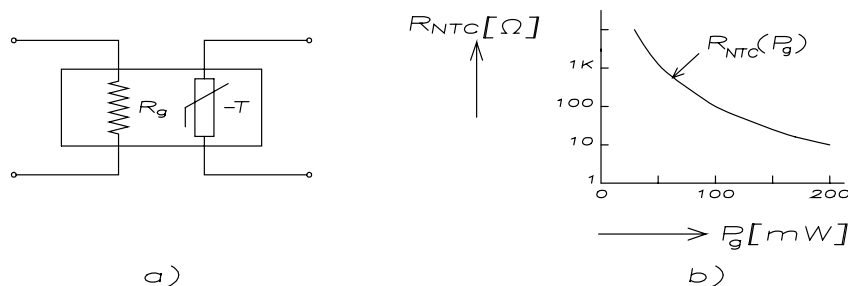
Dosedanja obravnava se je ukvarjala z navadnimi, direktno segrevanimi NTC termistorji, pri katerih je sprememba temperature povzročena z lastnim segrevanjem zaradi toka skozi element ali pa zaradi spremembe temperature okolice. Obstojajo tudi ti. indirektno segrevani termistorji (SI 3.8a), pri katerih je segrevanje povzročeno zaradi toka skozi ločen upor oz. grelec, ki pa je v dobrem termičnem kontaktu z NTC termistorjem. Električni simbol indirektno segrevanega termistorja (SI 3.8a) kaže na omenjene značilnosti.

Poleg standardnih podatkov, kot jih srečamo pri običajnih direktno segrevanih NTC termistorjih, podajajo proizvajalci za opis indirektno segrevanih NTC termistorjev še nekatere podatke:

- I(V) karakteristika za različne toke oz. moči na grelcu
- Karakteristika segrevanja: odvisnost upornosti NTC termistorja od moči na grelcu $R_{NTC}(P_g)$ (SI 3.8b)
- Koeficient toplotne zveze k : razmerje moči pri direktnem in indirektnem segrevanju, ki je potrebna za doseg iste temperature termistorja

$$k = \frac{P_{dir}}{P_{indir}} \quad (3.16)$$

Ker je P_{indir} vedno nekaj večja od P_{dir} zaradi toplotnih izgub v okolico pri indirektnem segrevanju, vedno velja $k < 1$. Tipične vrednosti znašajo $k = 0.5 \div 0.95$.



SI 3.8 Zgradba oz. simbol (a) in karakteristika segrevanja $R_{NTC}(P_g)$ (b) pri indirektno segrevanem NTC

3.1.9 APLIKACIJE NTC TERMISTORJEV

Pri aplikacijah NTC termistorjev izkoriščamo opisane osnovne temperaturno-električne lastnosti teh elementov. Aplikacije delimo v več skupin, glede na osnovno lastnost, ki se izkorišča pri dani aplikaciji:

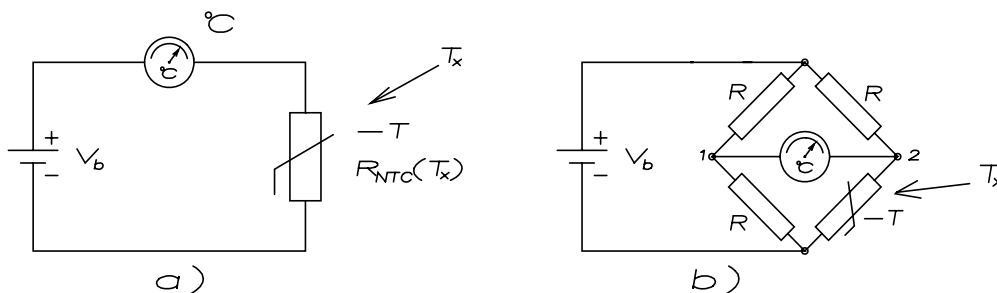
- odvisnost upornosti NTC termistorja od zunanje temperature: npr. merjenje in regulacija temperature, temperaturna kompenzacija (npr. upornosti neke tuljave s pozitivnim TK_R), itd.
- odvisnosti upornosti NTC termistorja zaradi segrevanja z lastnim tokom: npr. daljinsko krmiljenje, merilniki nivojev in pretokov fluidov (tekočin in plinov), merjenje νf moči, omejevanje zagonskih sunkov, itd.
- termična vztrajnost NTC termistorja (prehodni pojavi $T(t)$ ob vklopu ali izklopu): npr. časovno zakasneli releji
- nelinearnost stacionarne $V(I)$ karakteristike: npr. stabilizacija napetosti
- negativna diferencialna upornost stacionarne $V(I)$ karakteristike: npr. oscilatorji zelo nizkih frekvenc ($f < 1\text{Hz}$!)

V nadaljevanju bo podan opis nekaterih tipičnih aplikacij NTC termistorjev !

1. Meritev temperature

Enostavno, ceneno industrijsko meritev temperature prikazuje SI 3.9a (npr. meritev temperature vode v avtomobilu itd.). S spreminjanjem neznane temperature T_x se spreminja tudi temperatura NTC termistorja in s tem njegova upornost. Običajno imamo v zanki že kar umerjen instrument, ki direktno kaže neznano temperaturo T_x [$^{\circ}\text{C}$].

Natančnejša meritev temperature je realizirana z mostično izvedbo (SI 3.9b). Odstopanje upornosti NTC termistorja od ostalih treh uporov mostiča generira potencialno razliko med točkama 1 in 2, ki je torej odvisna od neznane temperature T_x . Pri enostavnejših izvedbah na izhod mostiča, med točke 1 in 2, priključimo kar umerjen instrument (SI 3.9b), pri natančnejših meritvah pa lahko vodimo izhod mostiča najprej na vhod nekega operacijskega ojačevalnika.



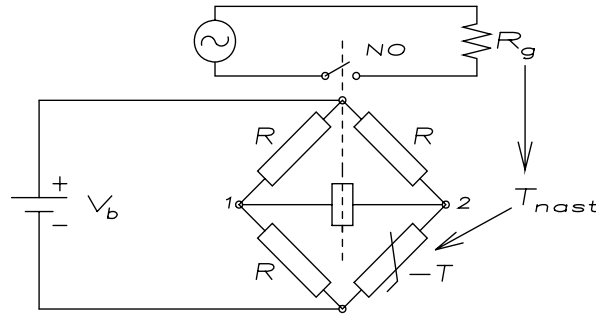
SI 3.9 Meritev temperature z NTC termistorjem: enostavno (a) in mostično (b)

2. Regulacija temperature

Primer regulacije temperature oz. vzdrževanja temperature na predpisani vrednosti (termostatiranje) z mostično izvedbo prikazuje Sl 3.10. Ob primerno izbranih elementih velja, glede na nastavljeno temperaturo T_{nast} , ki jo določimo s spremenljivim uporom R_1 ,

$T < T_{nast}, \quad R_{NTC} > R_1 \rightarrow V_{12} \neq 0$, rele napajan (ON), grelec greje, temperatura raste!

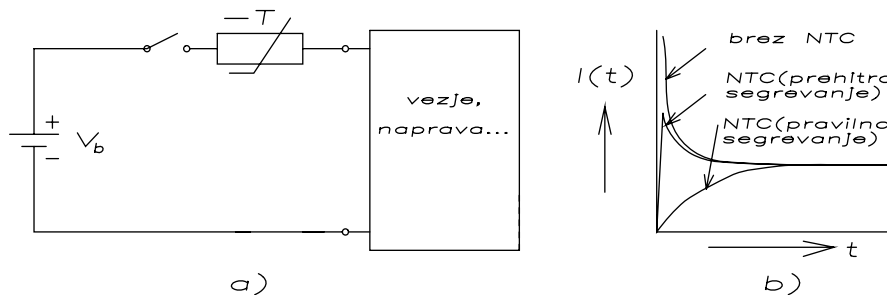
$T \sim T_{nast}, \quad R_{NTC} \sim R_1 \rightarrow V_{12} \sim 0$, rele ni napajan(OFF), grelec ne greje, temperatura pada itd.!



Sl 3.10 Regulacija temperature

3. Zaščita stikal in bremen pri vklopu

Ob vklopu nekega bremena (Sl 3.11a) pride pogosto do tokovnega sunka, ki lahko poškoduje ali vsaj skrajšuje življenjsko dobo vpletenih stikal in vezij. Začetni tokovni sunek ob vklopu lahko zmanjšamo ali celo odpravimo, če v serijo z bremenom vežemo primeren NTC termistor. V tem primeru je ob trenutku vklopa v zanki hladni NTC termistor s svojo visoko upornostjo in začetni tok bo majhen. Po vklopu se NTC termistor zaradi lastnega toka segreva, zato njegova upornost pada in tok počasi raste (Sl 3.11b).



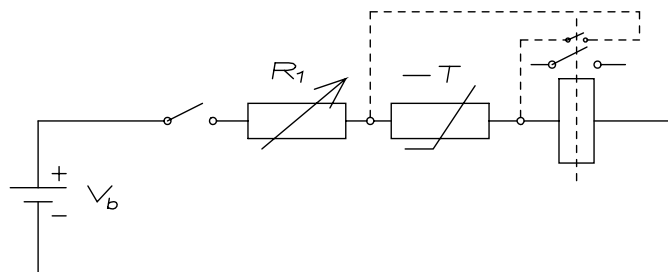
Sl 3.11 Vklp bremena (a) in časovni potek toka ob vklopu(b)

4. Zakasnilni rele

Včasih je ugodno, če nek rele vklopi z določeno zakasnitvijo (npr. ob vklopu večjega števila porabnikov, zaradi manjšega zagonkega toka itd.). Tak zakasnilni rele lahko enostavno realiziramo, če v serijo z relejem dodamo NTC termistor (Sl 3.12).

Brez NTC termistorja rele na Sl 3.12 preklopi v trenutku, ko staknemo stikalo. Če dodamo NTC termistor, bo ob vklopu ta še hladen in bo imel visoko upornost, tok bo zato premajhen za preklop releja. Vseeno se zaradi lastnega toka NTC termistor sčasoma segreva, upornost upada in tok raste, vse dokler ne doseže vrednosti, potrebne za preklop releja. Zakasnitev preklopa lahko tudi zvezno nastavljamo, če dodamo v serijo spremenljiv upor R_1 (Sl 3.12): če povečamo upornost R_1 , se bo tok pomanjšal in zakasnitev preklopa se poveča. Seveda velja tudi obratno.

Dodajmo, da opisana shema ne deluje dobro v primeru, kadar po izklopu takoj sledi ponoven vklop: NTC termistor se v tem primeru nima časa ohladiti in ne pride do zakasnitve vklopa! Če pa dodamo še ene delovne kontakte releja, ki kratko staknejo NTC termistor (črtkano na SI 3.12), se po preklopu NTC termistor ohladi in je pripravljen za takojšen zakasnilen vklop.



SI 3.12 Zakasnilni rele

5. Kontrola nivoja tekočin

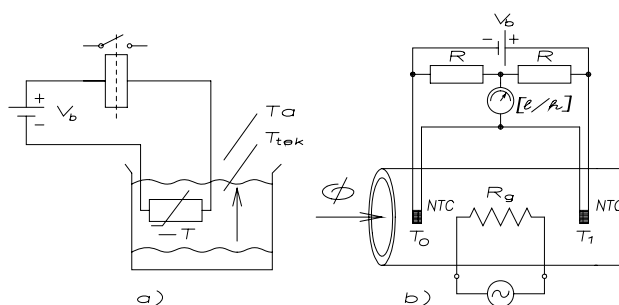
Enostavno kontrolo nivoja tekočin in sorodne probleme lahko izvedemo z NTC termistorjem kot prikazuje SI 3.13a. Ko nivo tekočine zraste do NTC termistorja, se temu spremeni temperatura zaradi spremenjenih pogojev odvajanja toplote in s tem njegova upornost, tok se spremeni, to povzroči preklop releja ter vklop npr. črpalke, alarma itd. Ko gladina upade, se vzpostavijo prvotni pogoji (črpalka, alarm itd. se izklopi).

6. Meritev pretoka fluidov

Na SI 3.13b je prikazan pogost princip meritve pretoka fluidov (tj. tekočin in plinov): v pretok fluida postavimo grelec med dva sensorja temperature. Čim manjši je pretok fluida, tem dalj časa se fluid zadržuje v področju grelca R_g in se zato segreje na višjo temperaturo. Razlika temperatur izstopajočega fluida T_1 in vstopajočega fluida T_0 je zato obratno proporcionalna pretoku Φ

$$\Phi = \frac{K}{T_1 - T_0} \quad (3.17)$$

NTC termistor je torej v tem primeru uporabljen le kot senzor temperature, podobno bi lahko uporabili tudi kakšen drug senzor temperature. Omenjeno temperaturno razliko lahko registriramo tudi na razne druge načine, npr. mostično (SI 3.13b): v tem primeru izhod iz mostiča direktno napaja umerjen instrument, ki kaže kar direktno pretok fluida Φ v enoti npr. [l/min].



SI 3.13 Kontrola nivoja tekočin (a) in meritev pretoka fluidov (b)

REFERENCE

- 1) E.D.MACKLEN, "THERMISTORS", ELECTROCHEMICAL PUBLICATIONS LIMITED, Glasgow, 1979.
- 2) PHILIPS Data handbook, "Negative temperature coefficient thermistors", Components and materials Book C11, 1986.
- 3) SIEMENS, "NTC and PTC Thermistors Applications", Germany, 1987.
- 4) ISKRA, "NTC, PTC Termistorji/Thermistors", Ljubljana, 1986/87.

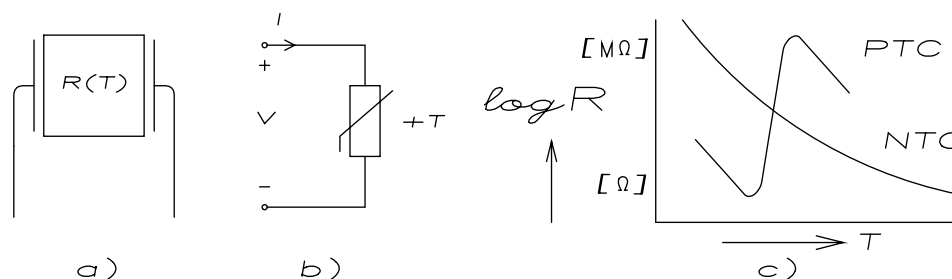
3.2 PTC TERMISTORJI

3.2.1 UVOD

Osnovno strukturo, električni simbol in temperaturno odvisnost upornosti PTC termistorja prikazuje Sl 3.14. PTC termistorji so upori z izredno visokim pozitivnim temperaturnim koeficientom upornosti v razredu $+5 \div +80 \% /K$!

V primerjavi z NTC termistorji kažejo karakteristike PTC termistorjev dve osnovni razliki (Sl 3.14b):

- PTC termistorji imajo pozitiven temperaturni koeficient le v ozkem temperaturnem intervalu, izven tega področja pa imajo negativen temperaturni koeficient oziroma se obnašajo kot NTC termistorji !
- V področju pozitivnega temperaturnega koeficienta je temperaturni koeficient zelo velik, mnogo večji kot pri NTC termistorjih!



Sl 3.14 Struktura(a), električni simbol(b) in temperaturna odvisnost upornosti(c) PTC termistorja

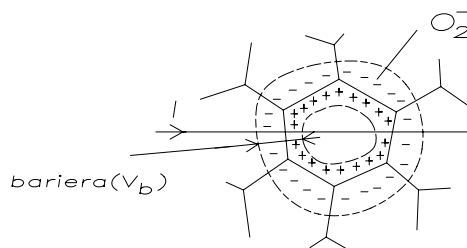
Materiali za izdelavo PTC termistorjev so v osnovi kovinski oksidi s feroelektričnimi lastnostmi (npr. $BaTiO_3$, včasih z dodatkom $SrTiO_3$).

Tehnologija je zato podobna kot pri NTC termistorjih (priprava keramične paste, sintranje itd.).

3.2.2 PTC EFEKT

Razlaga PTC efekta se prične podobno kot pri NTC termistorjih, v zvezi z nastankom polprevodniške keramike: v osnovnem materialu, npr. $BaTiO_3$, nadomestimo med sintranjem nekatere atome titana Ti ($Ti \rightarrow Ti^{4+} + 4e^-$) s primernimi 5-valentnimi atomi, npr. antimona Sb ($Sb \rightarrow Sb^{5+} + 5e^-$). To vodi do nastanka polprevodniške keramike N-tipa z NTC efektom, podobno kot je bilo že opisano pri NTC termistorjih. Vendar to velja le v primeru, ko poteka sintranje v inertni (neoksidativni) atmosferi. Izkaže se namreč, da dobimo v

primeru sintranja istega materiala v prisotnosti kisika PTC termistorski material z omenjenim PTC efektom!



SI 3.15 Barierna področja v zrnati strukturi keramičnega materiala

Nastanek PTC efekta v prisotnosti kisika lahko razložimo na sledeč način: kisikovi atomi zaradi visoke temperature sintranja prodirajo v globino materiala najhitreje po mejah med zrni v zrnati strukturi keramičnega materiala in se nato vgradijo predvsem na površini zrn (Sl 3.15). Ker želi biti kisikov atom v stanju O^{2-} , pritegne iz površinskega sloja zrna dva elektrona (e^-) in jih veže (imobilizira). Ker je bilo zrno pred tem neutralno, se zaradi primanjkljaja elektronov e^- pojavi v površinskem sloju zrna pozitiven prostorski naboj, in podobno na površini zrn tanka plast negativnega naboja na kisikove atome vezanih elektronov. Razmere v površinskem področju zrna so torej podobne situaciji v osiromašenem področju PN spoja in je zato obravnava, pa tudi rezultati, podobna: prostorski naboj v skladu s Poissonovo enačbo rodi električno polje, le-to pa potencialni skok preko bariere, ki ga pri PN spoju imenujemo difuzijska napetost, tu pa potencialno bariero

$$V_b = \frac{q}{2\epsilon} N_D d^2 \quad (3.18)$$

kjer je q osnovni naboj, N_D koncentracija vgrajenih donorskih atomov Ti, d širina bariere in ϵ dielektričnost materiala.

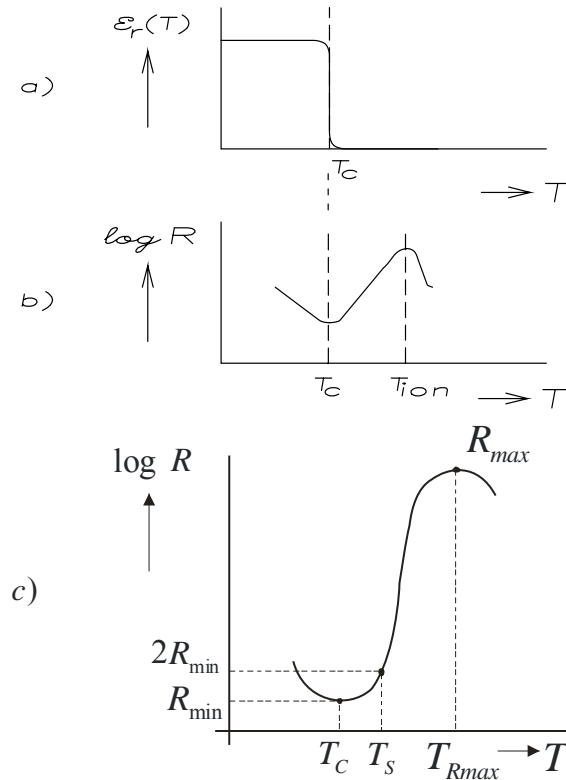
Bariera je izpraznjena prostih nosilcev in zato predstavlja visoko upornost za gibanje prostih nosilcev oz. električni tok. Ohmska upornost takega materiala eksponentialno narašča z višino bariere V_b

$$R = K e^{\frac{V_b}{V_T}} \quad (3.19)$$

Upornost takega materiala torej zaenkrat upada z naraščajočo temperaturo in zato izkazuje običajni NTC značaj.

Vendar povedano velja le do Curiejeve temperature T_c našega feroelektričnega materiala. V teh ti. feroelektričnih materialih je namreč značilno, da ima dielektričnost veliko vrednost vse do neke karakteristične temperature, ki jo imenujemo Curiejeva temperatura materiala T_c , nakar dielektričnost naglo upade (sl.16a).

Izkaže se, da od temperature T_c dalje prevzame odločilen vpliv na upornost materiala temperaturna odvisnost dielektrične konstante $\epsilon_r(T)$: v skladu z en(3.18) je, podobno kot pri PN spoju, tudi tukaj višina bariere obratno proporcionalna dielektričnosti materiala. Zato nad Curiejevo temperaturo višina bariere izredno naglo naraste in s tem še hitreje naraste tudi ohmska upornost materiala (sl.16b) - material se torej sedaj obnaša kot PTC !



SI 3.16 Temperaturna odvisnost dielektričnosti v feroelektričnem materialu(a), pripadajoči PTC efekt(b) in temperaturi T_s , T_{Rmax} (c)

Opisano naglo naraščanje upornosti s temperaturo oz. PTC efekt se pri višjih temperaturah (tipično pri $T_{ion}=150 \div 200^\circ\text{C}$, SI 3.16b) zaključí, ker pride do novega efekta: termične energije elektronov postanejo tedaj že dovolj visoke, da se pričnejo osvobajati na kisikove atome vezani elektroni v bariernem področju. Bariere zato razpadejo, PTC efekt izgine, material se ponovno obnaša kot NTC !

Poenostavljena predstava PTC

Poenostavljeno si PTC termistor torej lahko predstavljamo kot temperaturno kontrolirano stikalo, ki pri dani temperaturi preklopa (switch) T_s preklopi iz nizkoohmskega v visokoohmsko stanje

$$R_{NTC} [\Omega] \xrightarrow{T_s} R_{NTC} [M\Omega]$$

Tipično se pri tem preklopu poveča upornost elementa za faktor $10^{+2} \div 10^{+4}$!

Temperatura preklopa

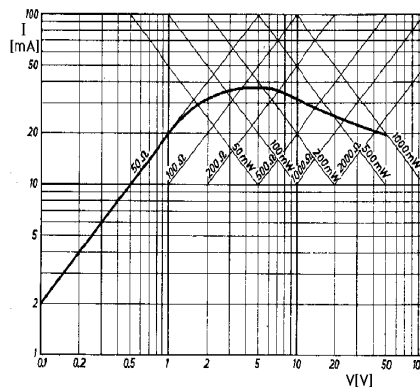
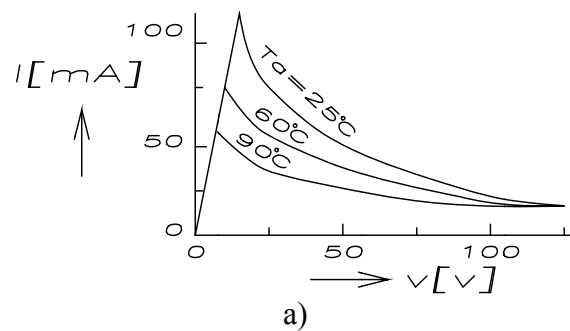
Proizvajalci običajno ne karakterizirajo PTC termistorjev s Curiejevo temperaturo materiala T_c , ampak iz praktičnih razlogov raje s temperaturo preklopa (switch) T_s , pri kateri se je prekop iz nizkoohmskega v visokoohmsko stanje če v znatni meri pričel. Temperatura preklopa T_s je definirana po ustaljenem dogovoru (standardu) kot temperatura, pri kateri je upornost PTC termistorja že narasla na vrednost $2R_{min}$! Tipične vrednosti temperatur preklopa T_s za različne PTC materiale se nahajajo v intervalu $-30 \div +200^\circ\text{C}$.

3.2.3 STACIONARNA KARAKTERISTIKA

Stacionarno $I(V)$ karakteristiko dobimo, če pritisnemo na PTC termistor neko napetost in počakamo z odčitkom toka, dokler se temperatura in tok elementa ne stabilizirata. Tipično stacionarno $I(V)$ karakteristiko PTC termistorja prikazuje SI 3.17a. Okrog izhodišča, pri nizkih napetostih, tokih in močeh je segrevanje zanemarljivo, element ima torej konstanto upornost in $I(V)$ zveza je linearna kot pri ohmskem upor. Pri višjih napetostih pa pride do segrevanja in temperature elementa raste. Ko element doseže temperaturo preklopa T_s , upornost izredno naglo narašča in tok upada, čeprav napetost raste (SI 3.17a).

Na prekop vpliva tudi temperatura ambianta T_a : pri višji temperaturi ambianta bo prišlo do preklopa hitreje, pri nižjih močeh oz. napetostih (SI 3.17a).

Pogosto proizvajalci stacionarno $I(V)$ karakteristiko zaradi velikih sprememb upornosti podajajo v logaritmskem merilu (SI 3.17b).



SI 3.17 Stacionarna $I(V)$ karakteristika PTC termistorja v linearnem (a) in logaritmskem (b) merilu

3.2.4 OSNOVNI PODATKI

Proizvajalci podajajo običajno naslednje osnovne podatke PTC termistorjev :

- Upornost pri dveh karakterističnih temperaturah pred in po preklopu, npr. R_{25} in R_{80} . Tipične vrednosti R_{25} so $1k\Omega \div 10 k\Omega$, po preklopu naraste upornost R_{25} tipično za faktor $10^{+2} \div 10^{+4}$.
- Temperatura preklopa T_s znaša, odvisno od materiala, tipično $-30^{\circ}\text{C} \div +200^{\circ}\text{C}$.
- Faktor disipacije D , imenovan tudi termična prevodnost oz. moč, ki je potrebna za spremembo temperature elementa za $+1^{\circ}\text{C}$, znaša tipično $5 \div 20 \text{ mW/K}$.
- Toplotna kapaciteta H podaja, koliko toplote element prejme ali odda pri spremembi temperature elementa za $+1^{\circ}\text{C}$, in znaša tipično $0.1 \div 10 \text{ J/K}$ ($1\text{kcal}=4200\text{J}$)
- Temperaturni koeficient upornosti znaša v PTC področju tipično $+5 \div +80 \text{ \% /K}$.
- Temperaturno območje delovanja znaša tipično $-50 \div +200^{\circ}\text{C}$.
- Maksimalne napetosti na elementu so tipično $10 \div 500\text{V}$.
- Termične časovne konstante ohlajanja (cooling) τ_c in segrevanja (response time) τ_r so tipično $1 \div 60\text{sec}$.

3.2.5 APLIKACIJE PTC TERMISTORJEV

O p o z o r i l i :

- Pri PTC termistorjih je še zlasti nevarno prekoračenje predpisane maksimalne dopustne napetosti V_{max} , ker v tem primeru sledi izredno naglo naraščanje moči in hitro uničenje elementa!
- Nedopustno je vezati več PTC termistorjev v serijo z namenom zvišati delovno napetost, ker je taka shema nestabilna: resnični PTC termistorji se med seboj običajno precej razlikujejo, zato se bo po priklopu napetosti oz. moči najprej segrel predvsem en element, prvi dosegel temperaturo preklopa in prekopil v visokoohmsko stanje. Zato se bo praktično na tem elementu pojavila celotna pritisnjena napetost in bo prišlo do preboja tega elementa. Če pri tem element pregori oz. ostane v neprevodnem stanju (odprte sponke, npr. zaradi pregorele metalizacijske linije), je serijska vezava že odpovedala, če pa pride pri preboju elementa do prevodnega stanja (kratak stik, npr. zaradi taljenja metalizacije), se cela zgodba ponovi na nekem naslednjem PTC elementu itd.

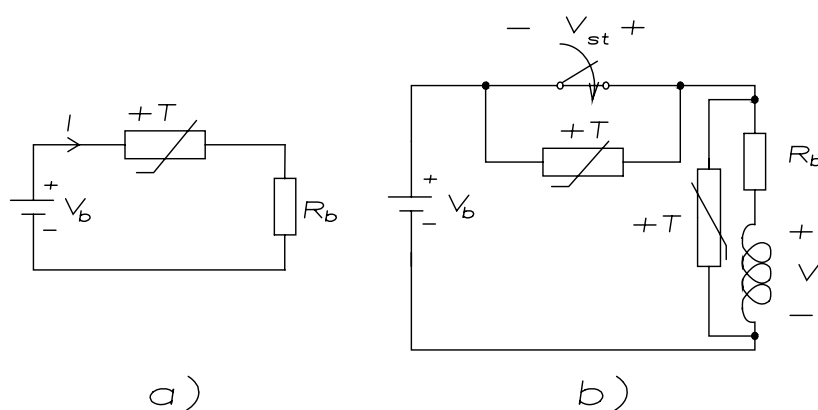
Opomba

Pri analizi aplikacij PTC termistorjev je pogosto koristna poenostavljena predstava PTC kot temperaturno kontroliranega stikala: pri temperature preklopa T_s PTC preklopi iz nizkoohmskega v visokoohmsko stanje oz. stikalo se izklopi(odprte sponke).

V nadaljevanju bodo kratko opisane nekatere tipične aplikacije PTC termistorjev.

1. Zaščita proti električni preobremenitvi

Kadar napetost ali tok narasteta čez določeno mejo, se zaradi sproščane moči PTC termistor segreje do temperature preklopa T_s in preklopi iz nizkoohmskega v visokoohmsko stanje ter s tem loči ščiteno breme od previsokega napajanja (SI 3.18a). Ko previsoka napetost ali tok upadeta na normalne vrednosti, se PTC ohladi in preklopi v nizkoohmsko stanje ter s tem ponovno priklopi breme na napajanje.



SI 3.18 Zaščita proti električni preobremenitvi(a) in zaščita stikala pred iskrenjem pri izklopu(b)

Obrni napetost v_{st}

2. Zaščita stikala pred iskrenjem pri izklopu

Uspešna zaščita stikala pred iskrenjem (SI 3.18b) je pomembna zaradi daljše življenjske dobe, nižjih EM motenj (EMI - Electromagnetic Interference), varnosti(npr. stikalo v bencinskem tanku ali zaprašenem televizorju), itd.

Izkustveno pravilo za odpravo iskrenja pri razklenitvi kontaktov stikala pravi, da iskrenja ne bo, če omejimo hkrati in tok in napetost stikala med razmikanjem kontaktov pod določene vrednosti! Kot primer navedimo stikalo srednjih moči s srebrnimi kontakti - izkustveno pravilo pravi, da v tem primeru pri izklopu ne bo iskrenja, če so med razmikanjem kontaktov izpolnjene naslednje omejitve:

$$I < 300\text{mA} \quad V < 300\text{V} !$$

Če je le ena od teh vrednosti presežena, lahko iskrenje samo zmanjšamo, v celoti odpraviti pa ga ne moremo!

Še zlasti so razmere kritične pri izklopu induktivnega bremena, kot to prikazuje Sl 3.18b. V tem primeru se na stikalu pojavi v trenutku izklopa poleg napajalne napetosti V_b še celotna inducirana napetost V_{ind} , ki lahko zaradi naglega upadanja toka v trenutku izklopa oz. razmikanja kontaktov doseže trenutno zelo visoke vrednosti

$$V_{st} = V_b - V_{ind} = V_b + L \left/ \frac{di}{dt} \right/ \quad (3.20)$$

Pri tem smo upoštevali, da je časovni odvod toka v trenutku preklopa zelo velik in negativen (tok naglo upada proti 0). Pri izklopu induktivnih bremen se zato pojavlja močno iskrenje.

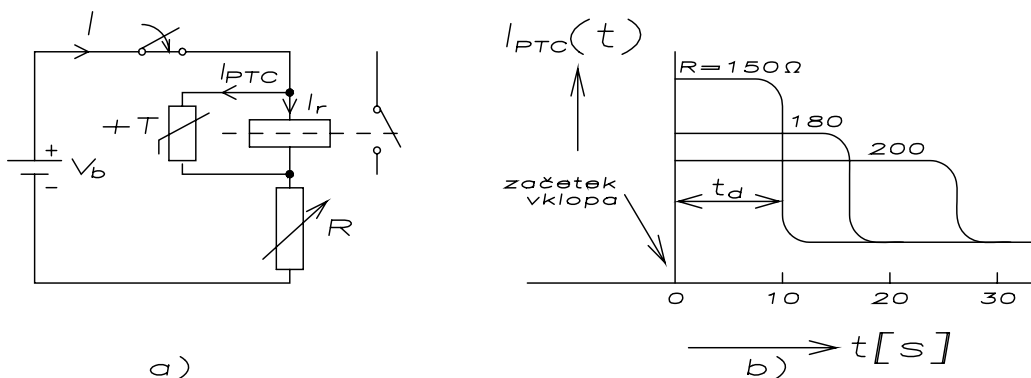
Delno ali v celoti lahko to iskrenje odpravimo z dodatkom PTC termistorjev v serijo s kontakti stikala: pred preklopom teče celoten tok le skozi stikalo, PTC je hladen in se torej nahaja v nizkoohmskem stanju. Ko se pričnejo kontakti razmikati, je zato na stikalu nizka napetost, iskrenja ni oz. je zmanjšano. Ker po izklopu teče celoten tok skozi PTC, se ta počasi segreva, doseže temperaturo preklopa T_s in preklopi v visokoohmsko stanje ter zavre tok. Izklop je tako "mehek", brez iskrenja in tokovnih ali napetostnih sunkov.

3. Zakasnilni rele

Včasih je ugodno, če stikalo preklopi z neko zakasnitvijo za prihodom prožilnega impulza, npr. pri vklopu večjega števila porabnikov (kot je ulična razsvetljava mesta itd.) zaradi nižje zagonske obremenitve.

Zakasnilni rele z nastavljivo zakasnitvijo lahko enostavno realiziramo s pomočjo paralelno k navitju releja vezanega PTC termistorja in serijsko vezanega spremenljivega upora, kot prikazuje Sl 3.19a. Ko pride prožilni impulz (vklop stikala), je PTC še v hladnem, nizkoohmskem stanju. Zato teče ves tok skozi PTC - rele ne preklopi, PTC pa se segreva. Po nekem času se PTC segreje do temperature preklopa T_s in preklopi v visokoohmsko stanje, preneha odžirati tok navitju releja, ki zato preklopi.

Zakasnilni (delay) čas t_d lahko nastavljamo s spremenljivim uporom R - če povečamo upornost, bo tok nižji, naraščanje temperature počasnejše in zakasnilni čas večji (Sl 3.19b).



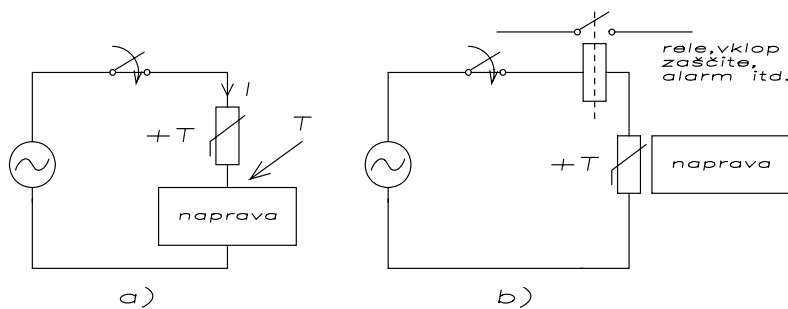
Sl 3.19 Zakasnilni rele (a) in nastavljanje zakasnitve (b)

4. Zaščita naprav pred električno in temperaturno preobremenitvijo

PTC termistor lahko direktno uporabimo tudi kot zaščitni element pri zaščiti neke električne naprave pred električno preobremenitvijo in previsoko temperaturo hkrati (SI 3.20a), lahko pa tudi kot zaščitni element pred previsoko temperaturo (overheat protection) poljubnih, tudi neelektričnih naprav (SI 3.20b).

V prvem primeru ob električni ali temperaturni preobremenitvi (SI 3.20a) ustrezno izbrani PTC (s primerno vrednostjo T_s) doseže temperaturo preklopa T_s in preklopi iz nizkoohmskega v visokoohmsko stanje ter s tem odklopi napravo od napajanja. Ko preobremenitev izgine, se PTC ohladi pod T_s in napravo ponovno priklopi na napajanje itd.

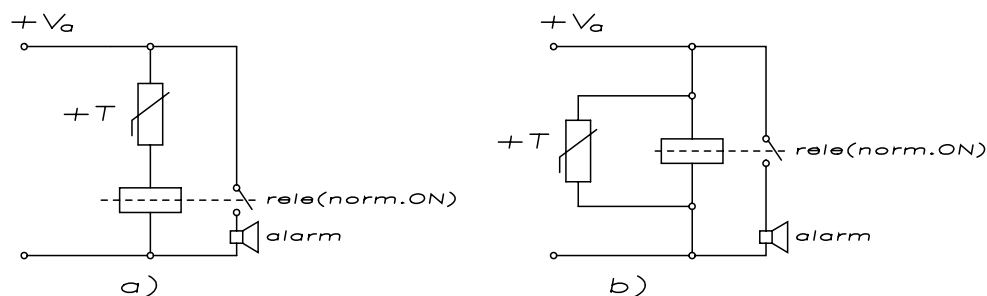
V drugem primeru je PTC uporabljen le kot tipalo previsoke temperature ščitene naprave (SI 3.20b). V primeru, ko temperatura naprave iz kateregakoli vzroka (električna preobremenitev, previsoka temperatura ambianta itd.) doseže kritično mejo, ki je določena s temperaturo preklopa T_s izbranega termistorja, bo zato le-ta preklopil v visokoohmsko stanje in to sporočil npr. z vklopom nekega alarma ali nekega zaščitnega hladilnega sistema, kot je to prikazano na SI 3.20b.



SI 3.20 Zaščita naprav pred električno preobremenitvijo in previsoko temperaturo(a) ter pred previsoko temperaturo(b)

5. Temperaturni alarm

Temperaturni alarm pred previsoko(SI 3.21a) in pred prenizko(SI 3.21b) temperaturo razložimo podobno kot v prejšnjem primeru. Alarm se vklopi, ko PTC doseže temperaturo preklopa T_s . Ko temperatura upade, se alarm izklopi itd.

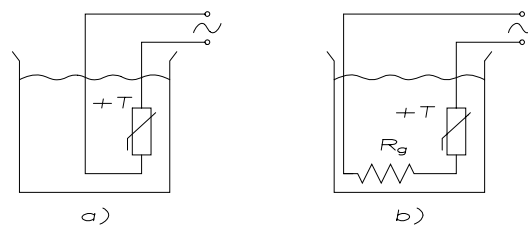


SI 3.21 Temperaturni alarm pred previsoko(a) in pred prenizko(b) temperaturo

6. Termostatiranje

Termostatiranje oz. vzdrževanje določene temperature s PTC termistorjem srečamo v dveh izvedbah: PTC je hkrati kontrolni element in grelec (SI 3.22a) oz. PTC je le kontrolni element, ki krmili moč na ločenem grelcu (SI 3.22b).

V obeh primerih je temperatura termostatiranja določena s temperaturo preklopa T_s izbranega PTC termistorja: dokler je temperatura v termostatiranem prostoru pod T_s , je PTC v nizkoohmskem stanju, teče tok, grelec greje, temperatura raste. Ko temperatura doseže T_s , PTC preklopi v visokoohmsko stanje, tok upade praktično na nič, grelec ne greje več, temperatura upada. Ko temperatura dovolj upade, PTC preklopi v nizkoohmsko stanje, tok ponovno steče itd.



SI 3.22 Termostatiranje: (a) PTC hkrati kot kontrolni element in grelec ter (b) PTC kot kontrolni element za moč na ločenem grelcu

7. PTC grelci

PTC keramični materiali imajo zanimive lastnosti tudi kot moderni grelni materiali. V primerne oblike oblikovani trakovi ali plošče iz PTC polprevodniške keramike služijo lahko kot moderni grelci, ki imajo vrsto prednosti pred klasičnimi grelci:

- avtotermostatiranost PTC grelcev: ko temperatura preseže temperaturo preklopa T_s izbranega PTC materiala, se grelec sam izklopi. Ko temperatura upade, se spet sam vklopi, itd.
- avtostabiliziranost PTC grelcev: grelna moč je tu praktično neodvisna od variacij napajalne napetosti - če napetost upade, se zniža temperatura in s tem upornost materiala, zato zraste tok in se s tem dvigne segrevanje na prvotno raven itd.
- glavna disipacija moči se odvija v notranjosti grelca, kar podaljšuje njegovo življenjsko dobo

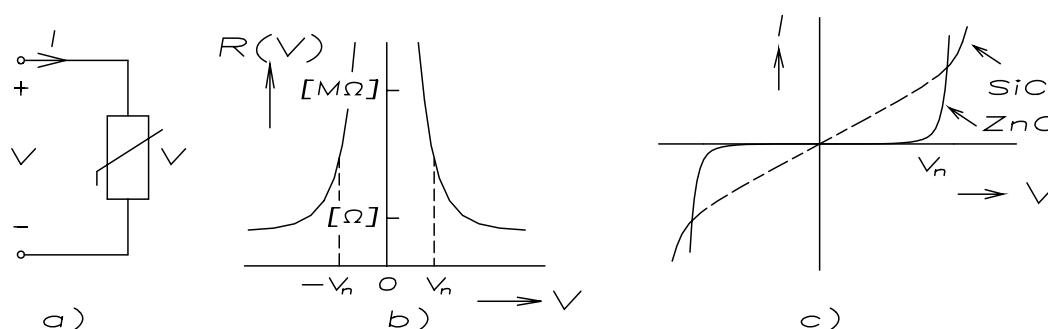
REFERENCE

- 1) E.D.MACKLEN, "THERMISTORS", ELECTROCHEMICAL PUBLICATIONS LIMITED, Glasgow, 1979.
- 2) PHILIPS Data handbook, "Positive temperature coefficient thermistors", Components and materials Book C11, 1986.
- 3) SIEMENS Data Book, "PTC thermistors", Germany, 1987/88.
- 4) SIEMENS, "NTC and PTC Thermistors Applications", Germany, 1987.
- 5) ISKRA, "NTC, PTC Termistorji/Thermistors", Ljubljana, 1986/87.
- 6) SIEMENS, "Kaltleiter", Datenbuch, West Germany, 1972/73.
- 7) W.Kahr, "The PTC Thermistor", Siemens Components XX, No.4, 1985

3.3 VARISTORJI

3.3.1 UVOD

Varistorji, imenovani tudi VDR (Voltage Dependent Resistors - Napetostno odvisni upori), so upori z visoko nelinearno odvisnostjo upornosti od napetosti. Simbol, napetostno odvisnost upornosti in $I(V)$ karakteristiko varistorja prikazuje Sl 3.23. Osnovna značilnost za te napetostno kontrolirane elemente je, da pri prekoračitvi neke napetosti, ki jo imenujemo **nazivna (nominal) napetost** varistorja V_n , včasih pa tudi napetost kolena, upornost elementa izredno naglo upade oz. tok izredno naglo naraste (Sl 3.23b,c).



Sl 3.23 Električni simbol, napetostna odvisnost upornosti in $I(V)$ karakteristika varistorja

Materiali, iz katerih so izdelani varistorji, so v osnovi kovinski oksidi, največkrat silicijev karbid SiC ali cinkov oksid ZnO. Tehnologija izdelave varistorjev je v osnovi enaka ostalim keramičnim tehnologijam (sintranje itd.), podobno kot je že opisano pri termistorjih. Materiali za izdelavo varistorjev imajo zrnato strukturo, podobno kot je bilo pokazano že pri termistorjih.

Pri nizki napetosti na elementu, manjši od nazivne napetosti V_n , je situacija podobna kot pri PTC termistorju: na površini zrn so bariere, brez prostih nosilcev, ki se zato obnašajo kot izolatorska področja. Varistor zato tedaj izkazuje visoko upornost (Sl 3.23b).

Pri visoki napetosti na elementu, večji od nazivne napetosti V_n , pride zaradi visokih napetosti oz. električnih polj v bariernih področjih do tuneliranja elektronov skozi bariere, bariere se zaradi Joulove toplote lokalno segrevajo do zelo visokih temperatur, zato pride do generacije novih nosilcev, toki rastejo, Joulovo segrevanje narašča itd. Upornost varistorja tedaj naglo upade za precej razredov velikosti (Sl 3.23b). Proces imenujemo kratko preboj, posledica je naglo upadanje upornosti. Proces je tudi zelo hiter, tudi v primerjavi z ostalimi konkurenčnimi zaščitnimi elementi (npr. Zenerjeva dioda), kar je ena izmed osnovnih odlik varistorja.

3.3.2 $I(V)$ KARAKTERISTIKA VARISTORJEV

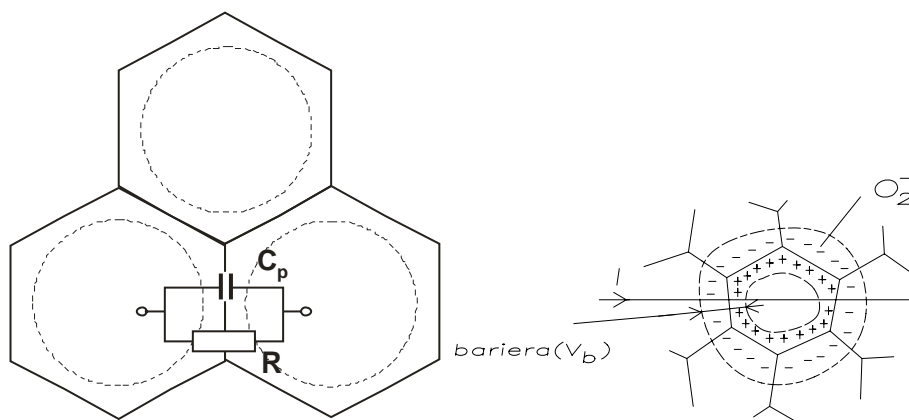
Nelinearnost $I(V)$ karakteristike varistorja (SI 3.23c) je določena s pojavi v bariernih področjih na mejah med kristalnimi zrnji materiala, podobno kot je bilo opisano v prejšnjem poglavju o termistorjih.

Pri nizkih napetostih pod nazivno napetostjo V_n ima varistor zelo visoko upornost, zato so toki zelo majhni.

Pri visokih napetostih nad nazivno napetostjo V_n upornost varistorja zelo naglo upada in toki izredno naglo naraščajo. Pojav je simetričen glede na pritisnjeno napetost (SI 3.23c), varistor torej deluje enako dobro pri obeh polarizacijah, pozitivni in negativni ter je zato direktno uporaben tudi za AC aplikacije. To spet odlikuje varistor v primerjavi z Zenerjevo diodo, kjer moramo pri AC aplikacijah uporabiti dve diode v protistiku.

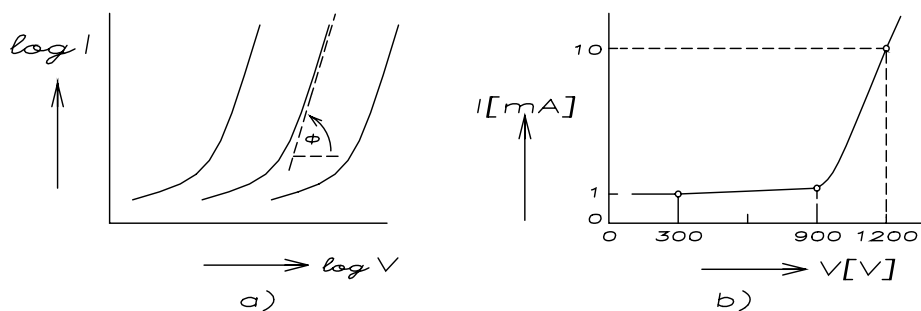
V splošnem imajo ZnO varistorji boljšo usmerniško karakteristiko kot SiC varistorji, kot prikazuje SI 3.23c.

Pri visokih frekvencah je potrebno upoštevati še parazitne kapacitivnosti bariernih področij C_p (SI 3.24). Parazitne kapacitivnosti premoščajo upornosti barrier, zato pri ωf signalih v splošnem toki naraščajo oz. upornost varistorja upada. Tudi v tem pogledu so ZnO varistorji precej boljši od SiC varistorjev, pri katerih je frekvenčna meja uporabnega delovanja precej nizka (tipično 1-10kHz).



SI 3.24 Parazitne kapacitivnosti bariernih področij

Tovarne podajajo izmerjene $I(V)$ karakteristike za družino varistorjev zaradi velikih variacij napetosti in tokov največkrat grafično v log-log merilu (SI 3.25a). Včasih $I(V)$ karakteristiko zaradi enostavnosti podajajo kar z vrednostmi napetosti in tokov v treh značilnih točkah, označenih s krogi na SI 3.25b.



SI 3.25 I(V) karakteristika družine varistorjev: a) log-log merilo, b) tri točke

3.3.3 ANALITIČNI OPIS VARISTORJEV

Včasih je I(V) odvisnost varistorja podana analitično. Odvisnost napetosti od toka varistorja je tedaj podana običajno s pomočjo dveh konstant C, β v obliki

$$V(I) = C I^{\beta} \quad (3.21)$$

Konstanta β je odvisna od materiala in znaša tipično pri SiC $0.15 \div 0.40$, pri ZnO pa $0.02 \div 0.035$. Konstanta C je zaradi velikih variacij podana redkeje, je v splošnem obratno proporcionalna β in ima vrednosti običajno v intervalu $10 \div 5000 \text{ V/A}^{\beta}$.

Včasih pa je podana obratna odvisnost, odvisnost toka od napetosti varistorja, s pomočjo dveh konstant K, α

$$I(V) = K V^{\alpha} \quad (3.22)$$

Primerjava z en(3.22) pokaže, da velja med konstantami zveza: $K = 1/C^{\alpha}$, $\alpha = 1/\beta$.

Konstanta α , ki podaja strmino naraščanja toka z napetostjo v I(V) karakteristiki, znaša torej tipično pri SiC varistorjih okrog 5 in pri ZnO varistorjih celo okrog 50! Tok varistorja torej raste z napetostjo pri SiC varistorjih kot V^5 , pri ZnO varistorjih pa celo kot V^{50} !

3.3.4 TEMPERATURNE LASTNOSTI VARISTORJEV

Uvod

Tipično področje delovanja varistorjev je $-25 \div +125^{\circ}\text{C}$ za delovanje pri ničelni moči oz. pri zanemarljivem lastnem segrevanju.

Varistorji so močno temperaturno odvisni elementi. Glavna temperaturna odvisnost se skriva v odvisnosti konstante C od temperature, odvisnost $\beta(T)$ se izkaže za zanemarljivo.

Zato je temperaturna odvisnost varistorjev določena kar s temperaturnim koeficientom konstante C TK_C , ki je običajno definiran kot relativna sprememba veličine (dC/C) na majhno spremembo temperature dT

$$TK_C = \frac{dC/C}{dT} = \frac{d \ln C}{dT} \quad (3.23)$$

Temperaturni koeficient TK_C je običajno velik in negativen, tipična vrednost je v razredu $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$.

Temperaturna odvisnost $I(V)$ karakteristike varistorja

Tipične spremembe toka in napetosti na varistorju prikazuje Sl 3.26. Spremembe napetosti in toka varistorja pri spremembi temperature podajajo tovarne na dva načina: s temperaturnim koeficientom pri konstantnem toku TK_I in s temperaturnim koeficientom pri konstantni napetosti TK_V na varistorju.

a) Temperaturni koeficient pri konstantnem toku TK_I :

V tem primeru je tok skozi varistor konstanten: $I = \text{const}$. Tu torej pri neki spremembi temperature varistorja ΔT vzdržujemo konstanten tok I in opazujemo relativno spremembo napetosti. Temperaturni koeficient varistorja je v tem primeru definiran kot razmerje med relativno spremembo napetosti pri spremembi temperature

$$TK_I = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \Big|_I = \frac{d \ln V}{dT} \Big|_I = \frac{d}{dT} [\ln C - (1-\beta) \ln I] \Big|_I = TK_C \quad (3.24)$$

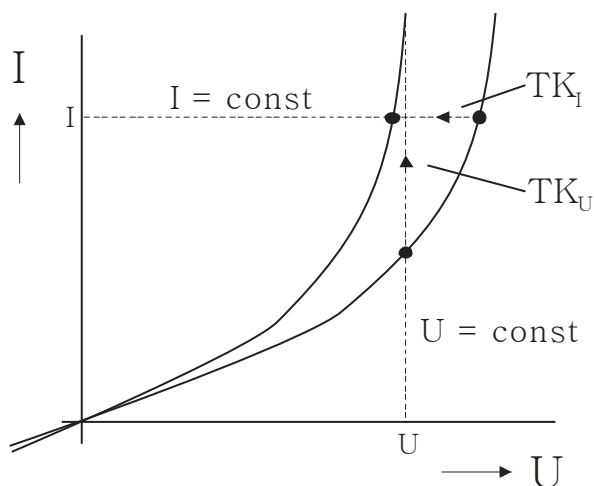
Pri tem smo uporabili Ohmov zakon $V = RI$ ter en(3.22). Pri konstantnem toku varistorja je torej pri spremembi temperature relativna sprememba napetosti na varistorju majhna in negativna(Sl 3.26), tipično $TK_C = -0.1\%/^{\circ}\text{C}$.

b) Temperaturni koeficient pri konstantni napetosti TK_V :

V tem primeru je napetost na varistorju konstantna: $V = \text{const}$. Tu torej pri neki spremembi temperature varistorja ΔT vzdržujemo konstantno napetost V in opazujemo relativno spremembo toka. Temperaturni koeficient varistorja je v tem primeru definiran kot razmerje med relativno spremembo toka pri spremembi temperature

$$\begin{aligned} TK_V &= \frac{1}{I} \frac{dI}{dT} \Big|_V = \frac{d \ln I}{dT} \Big|_V = \frac{d \ln(V/R)}{dT} \Big|_V = \frac{d}{dT} [\ln V - \ln R] \Big|_V = \\ &= -\frac{d}{dT} [\alpha \ln C - (\alpha-1) \ln V] \Big|_V = -\alpha TK_C \end{aligned} \quad (3.25)$$

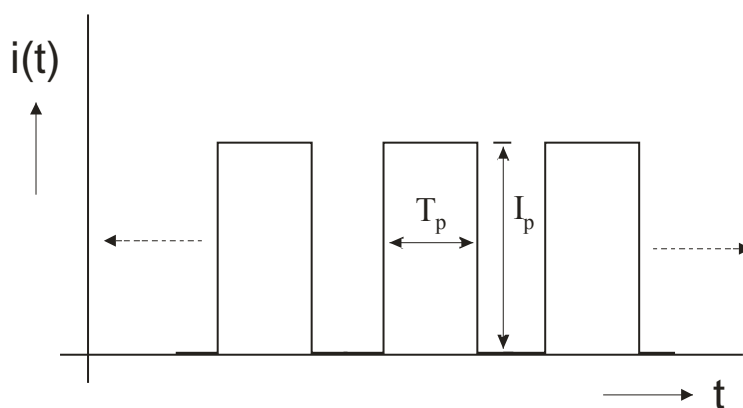
Pri tem smo uporabili Ohmov zakon $I = V/R$ ter en(3.22). Pri konstantni napetosti na varistorju je torej pri spremembi temperature relativna sprememba toka varistorja velika in pozitivna(Sl 3.26), tipično $-\alpha TK_C = +5\%/^{\circ}\text{C}$ pri ZnO varistorjih ($\alpha = 50$).

SI 3.26 Temperaturna odvisnost $I(V)$ karakteristike varistorja

3.3.5 OBREMENLJIVOST VARISTORJEV

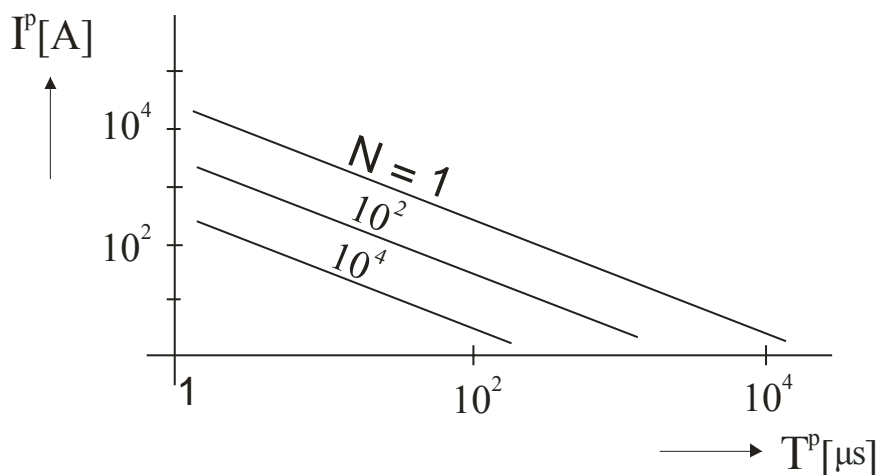
Kot smo videli že pri obravnavi uporov, v splošnem velja: čim večja je električna obremenitev(moč) na elementu, tem višja je temperatura elementa, zato hitreje staranje oz. degradacija in posledica je krajša življenjska doba elementa.

Običajno so varistorji obremenjeni s pulzi, kot prikazuje SI 3.27. Pri tem T_p podaja čas trajanja pulza, I_p pa amplitudo pulzov(v tem primeru tokovnih pulzov). Osnovno vprašanje pri taki aplikaciji je, kakšno obremenitev nek varistor še preživi, brez degradacije.



SI 3.27 Pulzna obremenitev

Proizvajalci običajno merijo in podajajo za svoje elemente obremenljivost: kolikšno je maksimalno število pulzov N , ki jih npr. nek varistor še preživi, brez degradacije, za pulze z dano dolžino pulzov T_p ter amplitudo I_p . Tipičen graf obremenljivosti prikazuje SI 3.28. Kot pričakujemo, maksimalno dopustno število pulzov upada s časom trajanja in amplitude pulzov.



SI 3.28 Graf obremenljivosti

Prikažimo povedano še na nekem praktičnem primeru.

Primer: Varistor z grafom obremenljivosti na SI 3.28 mora prenesti obremenitev z $N = 100$ tokovnimi pulzi dolžine $T_p = 100\mu\text{s}$. Kolikšna je maksimalna dopustna amplituda pulzov I_p ? Kaj pa, če uspemo pulze skrajšati na $T_p = 10\mu\text{s}$?

Rešitev: Za vrednosti $T_p = 100\mu\text{s}$, $N = 100$ iz grafa obremenljivosti na SI 3.28 odčitamo maksimalno dopustno amplitudo pulzov v tem primeru:

$$\underline{I_p = 5A}$$

Za skrajšane pulze $T_p = 10\mu\text{s}$ iz grafa obremenljivosti na SI 3.28 odčitamo maksimalno dopustno amplitudo pulzov v tem primeru:

$$\underline{I_p = 50A}$$

Kot pričakujemo, skrajšanje pulzov pomeni manjšo obremenitev in se zato maksimalna dopustna amplitude pulzov lahko zveča.

3.3.6 OSNOVNI PODATKI VARISTORJEV

Tipične maksimalne dopustne oz. nazivne moči so $0.1 \div 1W$, maksimalne dopustne oz. nazivne napetosti pa tipično $10V \div 1kV$.

Temperaturno področje delovanja je tipično $-25 \div +125^\circ\text{C}$ pri ničelni moči ter $-25 \div +55^\circ\text{C}$ pri nazivni moči.

Pri visokih frekvencah se pojavi še vpliv parazitnih kapacitivnosti bariernih področij. Zato upornosti varistorjev v splošnem z naraščajočo frekvenco upadajo oz. se njihove lastnosti slabšajo. Ta pojav je še zlasti kritičen pri varistorjih na osnovi SiC, ki ima zato mejo uporabnosti če pri frekvencah $1\text{kHz} \div 10\text{kHz}$. Precej boljši so v tem pogledu varistorji na

osnovi ZnO, ki delujejo dobro do zelo visokih frekvenc, tako da pri njih v praksi tega efekta ne zaznamo.

3.3.7 APLIKACIJE VARISTORJEV

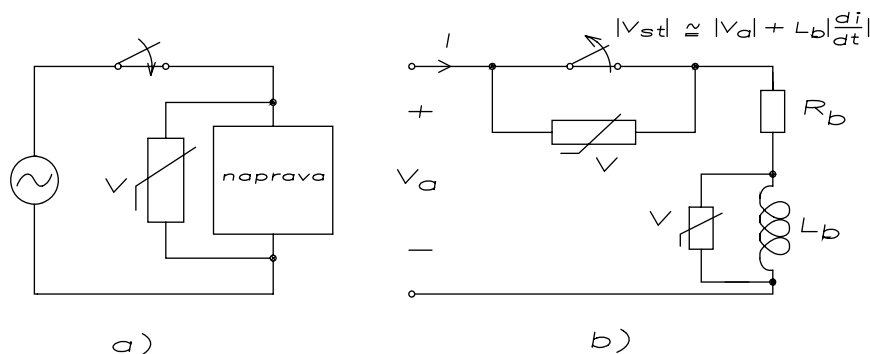
Opozorilo: zaradi izredno naglega naraščanja toka varistorja z napetostjo, npr. proporcionalno V^{50} pri ZnO varistorjih, je treba strogo spoštovati predpisane omejitve, še zlasti nazivne napetosti V_n , saj že pri najmanjših prekoračitvah moč oz. temperatura elementa naglo naraste. Razmere so še dodatno neugodne zaradi negativnega koeficienta upornosti varistorjev.

Opomba: Varistorji so zaradi simetričnosti $I(V)$ karakteristike (Sl 3.23c) podobni dvema protismerno vezanima usmerniškim diodama, zato se uporabljajo zlasti kot zaščitni elementi pred previsokimi napetostmi pri DC in AC aplikacijah.

1. Limitiranje in stabilizacija napetosti

Varistor kot zaščitni element vežemo vzporedno k varovani napravi (Sl 3.28a). Kadar napajalna napetost preseže nazivno napetost varistorja V_n , bo v skladu z njegovo $I(V)$ karakteristiko stekel skozi varistor velik tok, tako da napetost na varistorju ne bo preseгла njegove nazivne napetosti V_n . Presežna moč se sprošča na varistorju, ki mora seveda biti ustrezno izbran (dimenzioniran) za to sproščanje moči oz. njeno odvajanje, da bo to prenesel brez posledic - nazivna moč elementa P_n pri dani temperaturi ambienta T_a mora torej biti primerno velika !

Enaka električna shema in razlaga veljata tudi v primeru, ko je varistor uporabljen kot stabilizator napetosti. V tem primeru mora biti napajalna napetost stalno malo nad nazivno napetostjo, vendar mora biti varistor tudi v tem primeru ustrezno izbran (P_n), da bo prenesel to stalno disipacijo moči .



SI 3.29 Limitiranje in stabilizacija napetosti(a) ter zaščita stikala pred iskrenjem pri izklopu(b) z varistorjem

2. Zaščita stikala pred iskrenjem pri izklopu

Varistor se uporablja tudi za zaščito kontaktov stikala pred iskrenjem pri izklopu (SI 3.28b). Problem izklopa je bil podrobneje opisan že pri aplikacijah PTC termistorjev. Varistor dodamo paralelno k ščitenu stikalu. Varistor s svojim delovanjem v vsakem trenutku izklopa omeji napetost na stikalu pod nazivno napetost V_n in s tem prispeva k odpravi ali vsaj zmanjšanju iskrenja. Pri izklopu induktivnih bremen je v praksi običajno najučinkoviteje, če poleg tega tudi vsa induktivna bremena zaščitimo s paralelnimi varistorji, ki uničijo sunke napetosti če pri izvoru.

REFERENCE

- 1) PHILIPS Data handbook, "VARISTORS", Components and materials Book C11, 1986.
- 2) Č.A.Spasojevič, Z.V.Popovič, "ELEKTROTEHNIČKI I ELEKTRONSKI MATERIJALI", Naučna knjiga, Beograd, 1979.
- 3) J.Benda, M.Cergolj, "Metaloksidni varistorji", Informacije MIDEM, 2, 1988.
- 4) C.Kittel, "UVOD U FIZIKU ČVRSTOG STANJA", Savremena administracija, Beograd, 1970.
- 5) GENERAL ELECTRIC, "GE-MOV II VARISTORS", USA, 1983.
- 6) L.M.Levinson, "Advances in Varistor Technology", Ceramic Bulletin, 1989.