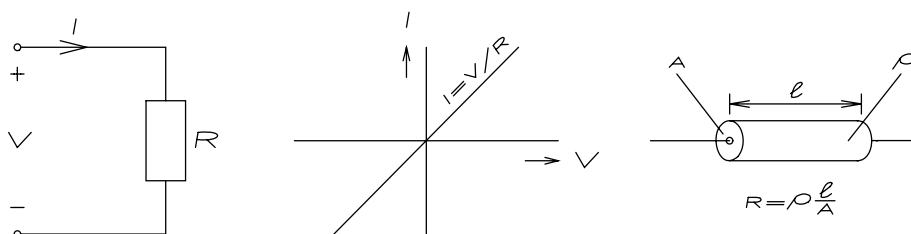


2 OHMSKI UPORI

- 2.1 UVOD
- 2.2 OSNOVNE LASTNOSTI UPOROV
- 2.3 ZNAČILNOSTI UPOROVNIH DRUŽIN

2.1 UVOD

Ohmski upori spadajo med najpogostejše elemente v elektronskih vezjih. Električni simbol elementa, $i(v)$ karakteristiko in izračun upornosti enostavnega upora prikazuje Sl 2.1. Zveza med tokom in napetostjo je linearna, zato pravimo tem uporom tudi linearni upori.



Sl 2.1 Osnovne lastnosti idealnega upora

Osnovni opis elementa je zveza med tokom in napetostjo na uporu (Ohmov zakon)

$$i = \frac{v}{R} = G \cdot v \quad (2.1)$$

kjer je R (totalna, enosmerna) upornost in $G = 1/R$ prevodnost upora. Upornost je pri enostavnih razmerah, kot prikazuje Sl 2.1, določena s specifično upornostjo uporovnega materiala ρ [Ohm-cm] in geometrijo upora (preseka A , dolžina l).

Idealen upor

Idealen upor je v celoti opisan le s svojo upornostjo. Parazitnih komponent (C , L) tu ni oz. so enake nič.

Realen upor

Realen (resničen) upor vsebuje poleg svoje osnovne, koristne lastnosti - upornosti - vedno še različne nekoristne, parazitne kapacitivnosti in induktivnosti. Parazitni elementi lahko, zlasti pri višjih frekvencah, močno spremenijo lastnosti upora (več kasneje pri vf lastnostih uporov).

Nazivna upornost R_n

V katalogih proizvajalci za svoje upore običajno podajajo njihove nazivne (nominal) vrednosti upornosti R_n .

Definicija: Nazivna upornost R_n je pričakovana vrednost upornosti danega upora !

Komentar: Za uporabnika/kupca predstavlja nazivna upornost R_n le najbolj verjetno vrednost kupljenega upora. Resnična (izmerjena) vrednost kupljenega upora se lahko od nazivne vrednosti razlikuje, vendar pa odstopanje ne sme biti večje kot znaša toleranca dane uporovne družine (več kasneje pri obravnavi tolerančnih razredov !).

Primer: Kupljeni upor ima kataloške podatke: $R_n = 10\text{k}\Omega$, toleranca uporovne družine je 10%. Kakšno resnično (izmerjeno) upornost R kupljenega upora lahko pričakujemo ?

Rešitev: Maksimalno odstopanje izmerjene upornosti R od nazivne upornosti R_n , kar označimo z $\Delta R = R - R_n$, je torej 10%. V našem primeru to znaša $\Delta R = \pm 1\text{k}\Omega$. Izmerjene vrednosti upornosti R se torej nahajajo v intervalu $R = 9\text{k}\Omega - 11\text{k}\Omega$.

2.2 OSNOVNE LASTNOSTI UPOROV

2.2.1 OZNAKA UPOROV Z BARVNO KODO

V skladu z mednarodno barvno kodo IEC (International Electrotechnical Commission) podajajo barvni kolobarji na telesu upora osnovne uporove podatke: nazivno upornost, toleranco upornosti in temperaturni koeficient upornosti (Sl 2.2). Kolobarji so izbrani namesto pik zaradi večje odpornosti proti poškodbam in možnosti odčitavanja iz vseh pozicij.

Kadar je uporabljena osnovna oznaka s šestimi kolobarji (Sl 2.2), podajajo prvi trije kolobarji

število, ki ga moramo pomnožiti še z multiplikatorjem 10^m , kjer je m določen z barvo četrtega kolobarja, da dobimo številčno vrednost nazivne upornosti. Peti kolobar podaja tolerance in običajno odebeljeni šesti kolobar na drugem koncu upora temperaturni koeficient upornosti. Podrobnosti podaja SI 2.2.

Primer: Določi lastnosti upora z naslednjimi barvnimi kolobarji:

rjava črna črna rdeča srebrna črna

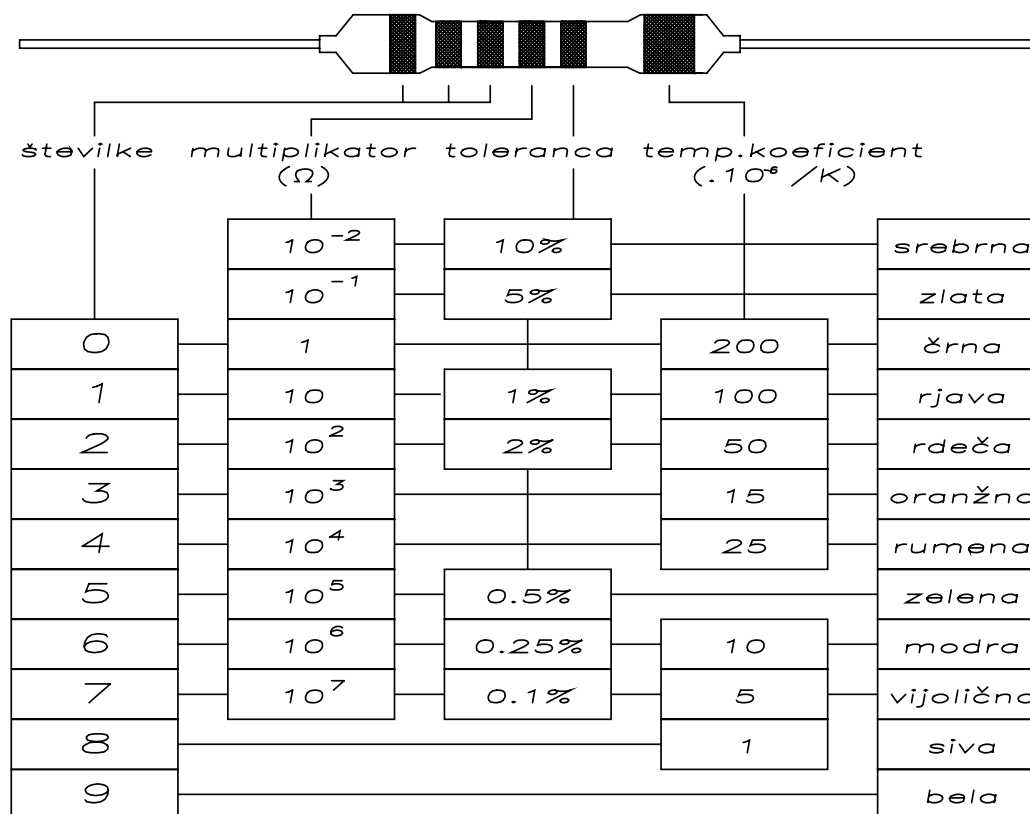
Rešitev: S pomočjo barvne kode (SI 2.2) določimo pripadajoče številčne vrednosti:

1	0	0	2	10	200
---	---	---	---	----	-----

Torej:

100 $\times 10^2$ 10 % 200ppm/K

Odgovor: Upornost upora znaša $10\text{k}\Omega$, toleranca $\pm 10\%$ in temperaturni koeficient $\text{TK}_R = 200\text{ppm/K} = 200 \cdot 10^{-6} / \text{K}$.



SI 2.2 Oznaka uporov z barvno kodo IEC

Kadar je uporabljena oznaka s petimi kolobarji, velja vse tako kot v prejšnjem primeru, le kolobar za temperaturni koeficient je izpuščen. V primeru oznake upora s štirimi kolobarji pa je še dodatno izpuščena ena od prvih treh števil.

2.2.2 OZNAKA UPOROV Z ALFANUMERIČNO KODO

Včasih so upori označeni z alfanumerično IEC kodo, torej enostavno s črkami in številkami, ki so natisnane na uporovnem telesu. Običajno sta na ta način podani nazivna upornost in toleranca upora. Pri tem srečamo več možnosti, ki jih bomo na kratko pregledali:

- za oznako nižjih upornosti je na uporju natisnana številka, ki direktno podaja nazivno upornost v ohmih. Včasih je zaradi jasnosti dodana še črka R ali E.

Primer: upor 75Ω → oznaka na uporju: 75, 75R ali 75E

- za oznako višjih upornosti so dodane še ustrezne črke, ki podajajo velikostni razred nazivne upornosti.

Primer: upor $75\text{ k}\Omega$ → oznaka na uporju: 75K

$75\text{ M}\Omega$ → oznaka na uporju: 75M itd.

- kadar nastopa v vrednosti upornosti decimalna vejica oz. pika, je v oznaki na uporju le-ta nadomeščena z ustrezno črko.

Primer: upor 0.15Ω → oznaka na uporju: 0R15

5.5Ω → oznaka na uporju: 5R5

1700Ω → oznaka na uporju: 1K7 itd.

Opisanim oznakam za nazivno upornost sledi oznaka za toleranco upora, ki je podana s črko po naslednji dogovorjeni kodi

B	0.1 %		
C	0.25 %	Q	-10 - +30 %
D	0.5 %	T	-10 - +30 %
F	1 %	S	-20 - +50 %
G	2 %		
J	5 %		
K	10 %		
M	20 %		

Gornje velike vrednosti toleranc (Q, T, S) srečamo zlasti pri nekaterih vrstah kondenzatorjev, kjer nas odstopanje vrednosti navzgor ne moti, saj je kvečjemu koristno (npr. pri gladilnih kondenzatorjih itd.).

Često tovarne še vedno označujejo elemente po svojih tradicionalnih internih oznakah (npr. črka za toleranco je včasih nadomeščena z ustrezno številko, včasih podaja toleranco barva osnovnega laka upora itd.). V takih primerih je najzanesljiveje poseči po originalnem katalogu proizvajalca.

2.2.3 TOLERANČNI RAZREDI IN RENARDOVE LESTVICE

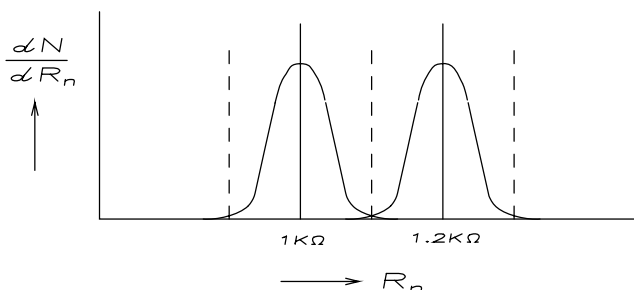
UVOD

Pojem tolerančnih razredov srečamo v različnih področjih tehnike - povsod, kjer imamo opravka z odstopanjem lastnosti proizvedenih elementov od nazivnih vrednosti. Tolerančni razredi omogočijo proizvajalcu, da uporabi za prodajo vse dobre proizvedene elemente.

Renardove lestvice pa rešujejo problem optimalnega izbora nazivnih vrednosti. Izbor nazivnih vrednosti po Renardovi lestvici ima za posledico enakomerno pokritost celotnega področja nazivnih vrednosti. Tako srečamo Renardove lestvice povsod v tehniki, npr. pri izboru nazivnih upornosti neke uporovne družine, pri izboru nazivnih kapacitivnosti kondenzatorjev, nazivnih prebojnih napetosti neke družine prebojnih (Zener) diod itd.

2.2.3.1 Tolerančni razred

Poglejmo kot primer nekega velikega proizvajalca uporov. Pri izdelavi velikega števila uporov končne, izmerjene upornosti izdelanih uporov vedno odstopajo od ciljanih nazivnih upornosti R_n dane uporovne družine ($1\text{k}\Omega$, $1.2\text{k}\Omega$, itd.). Meritve pokažejo, da ima pri dobri tehnologiji odstopanje izmerjenih upornosti Gaussovo porazdelitev okrog ciljanih nazivnih vrednosti (SI 2.3): pri dobri tehnologiji je največ izdelanih uporov v bližini ciljane vrednosti, z oddaljenostjo od te vrednosti pa število uporov upada.



SI 2.3 Porazdelitev izdelanih uporov okrog ciljanih nazivnih vrednosti R_n

Če bi proizvajalec jamčil v prodajnem katalogu točne vrednosti uporov, bi torej od celotnega števila proizvedenih uporov lahko uporabil le zelo majhen del, v limitnem primeru celo noben upor ne bi bil uporaben! Zato za rešitev omenjenega problema proizvajalci uporov vpeljejo sprejemljive, primerno široke intervale dopustnega odstopanja upornosti prodajanih uporov. To omogoči uporabo vseh dobrih uporov, saj vsak proizvedeni upor pade v nek interval (črtkana področja okrog nazivne vrednosti na SI 2.3). Ta dopustna odstopanja od nazivnih vrednosti se imenujejo tolerančni razredi oz. toleranca. Proizvajalec torej sedaj jamči le, da bo resnična (izmerjena) upornost nekega upora odstopala od nazivne vrednosti največ za dano toleranco.

2.2.3.2 Renardove lestvice

Kot naslednji problem se pojavlja optimalen izbor nazivnih vrednosti. Če bi npr. proizvajalec nazivne vrednosti R_n v neki uporovni družini izbral najenostavnejše kar iz množice naravnih števil

$$\dots, 1\text{k}\Omega, 2\text{k}\Omega, 3\text{k}\Omega, \dots, 99\text{k}\Omega, 100\text{k}\Omega, 101\text{k}\Omega, \dots$$

bi bile visoke upornosti npr. z vrednostmi okrog $100\text{k}\Omega$ zelo dobro približane, v najslabšem primeru na 0.5% natančno, medtem ko bi bile nizke upornosti npr. okrog $1\text{k}\Omega$ zelo slabo približane, v najslabšem primeru na 50% natančno! Tak izbor nazivnih vrednosti seveda ni primeren, saj so lastnosti električnega vezja običajno določene z največjim relativnim odstopanjem elementov od nazivnih vrednosti v vezju.

Postavlja se torej vprašanje, ali je mogoč tak izbor nazivnih vrednosti, da bi bile vse upornosti v najslabšem primeru približane z enakim procentom odstopanja oz. tolerance.

Izkaže se, da je ta zahteva izpolnjena, kadar so nazivne vrednosti členi nekega geometričnega zaporedja. Takemu izboru nazivnih vrednosti rečemo tudi Renardova lestvica.

V Renardovi lestvici je torej n -ti člen določen z izrazom

$$N_n = a r^{n-1} \quad (2.2)$$

kjer je $n = 1, 2, 3, \dots$ tekoči indeks geometričnega zaporedja
 $a \dots$ 1. člen zaporedja ($n=1$)
 $r \dots$ razmerje geometričnega zaporedja ($r = N_{n+1}/N_n$ oz. $N_{n+1} = r N_n$)

Največkrat srečamo v praksi dekadne Renardove lestvice, pri katerih se ponavljajo vrednosti znotraj ene dekadne. Dekadne Renardove lestvice dobimo, če v gornjih enačbah postavimo

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ r &= \sqrt[k]{10} \end{aligned} \quad (2.3)$$

kjer je k celo število in določa število nazivnih vrednosti na dekada.

Primer: Določi člene Renardove lestvice E12 (12 členov na dekada)!

Rešitev: Za lestvico E12 velja $k = 12$ in je tedaj

$$r = \sqrt[12]{10} \cong 1.2_{12} \dots \quad (2.4)$$

Odgovor: Nazivne vrednosti lestvice E12, ob zaokroževanju na dve decimalni mesti, so torej:

1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2 10 12 15 itd.

Preprost račun pokaže, da so maksimalna odstopanja oz. tolerančni razredi sedaj konstantni ($\pm 10\%$) po vsej lestvici! Zato včasih lestvico E12 imenujemo tudi Renardova lestvica s toleranco 10%.

Podobno tvorimo tudi druge Renardove lestvice, npr.

E24: 1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 itd.

Preprost račun pokaže, da je E24 tolerančna lestvica s toleranco 5%!

Navedimo nekaj pogostejših Renardovih tolerančnih lestvic s pripadajočimi tolerancami:

Tabela 1 prinaša nazivne vrednosti nekaterih pogostejših Renardovih lestvic.

E12	(12 členov na dekada)	10%
E24	(24 členov na dekada)	5%
E48	(48 členov na dekada)	2%
E96	(96 členov na dekada)	1%
E192	(192 členov na dekada)	0.5%

Tabela 2 Nazivne vrednosti pogostejših Renardovih lestvic

E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	
100	100	100	169	169	169	287	287	287	487	487	487	825	825	825	
101			172			291			493			835			
102	102		174	174		294	294		499	499		845	845		
104			176			298			505			856			
105	105	105	178	178	178	301	301	301	511	511	511	866	866	866	
106			180			306			517			876			
107	107		182	182		309	309		523	523		887	887		
109			184			312			530			898			
110	110	110	187	187	187	316	316	316	536	536	536	909	909	909	
111			189			320			542			920			
113	113		191	191		324	324		549	549		931	931		
114			193			328			556			942			
115	115	115	196	196	196	332	332	332	562	562	562	953	953	953	
117			198			336			569			965			
118	118		200	200		340	340		576	576		976	976		
120			203			344			583			988			
121	121	121	205	205	205	348	348	348	590	590	590				
123			208			352			597						
124	124		210	210		357	357		604	604		E24	E12	E6	E3
126			213			361			612						
127	127	127	215	215	215	365	365	365	619	619	619	10	10	10	10
129			218			370			626			11			
130	130		221	221		374	374		634	634		12	12		
132			223			379			642			13			
133	133	133	226	226	226	383	383	383	649	649	649	15	15	15	
135			229			388			657			16			
137	137		232	232		392	392		665	665		18	18		
138			234			397			673			20			
140	140	140	237	237	237	402	402	402	681	681	681	22	22	22	22
142			240			407			690			24			
143	143		243	243		412	412		698	698		27	27		
145			246			417			706			30			
147	147	147	249	249	249	422	422	422	715	715	715	33	33	33	
149			252			427			723			36			
150	150		255	255		432	432		732	732		39	39		
152			258			437			741			43			
154	154	154	261	261	261	442	442	442	750	750	750	47	47	47	47
156			264			448			759			51			
158	158		267	267		453	453		768	768		56	56		
160			271			459			777			62			
162	162	162	274	274	274	464	464	464	787	787	787	68	68	68	
164			277			470			796			75			
165	165		280	280		475	475		806	806		82	82		
167			284			481			816			91			

2.2.4 NAZIVNA MOČ UPORA

Uvod

Nazivno moč bomo obravnavali na primeru upora, vendar ugotovitve v tem poglavju veljajo splošno, za vsak električno obremenjen element ali vezje, od npr. upora, transistorja do mikroprocesorja.

Na obremenjenem oz. delujočem uporu je neka napetost V oz. tok $I = V/R$ in s tem električna obremenitev oz. električna moč $P=VI$. Ta električna moč se na uporu troši oz. pretvarja v toploto, ki jo segreti upor oddaja v okolico.

Definicija: nazivna moč (nominal power) P_n upora je maksimalna dopustna moč električne obremenitve, ki jo upor še prenese brez degradacije!

Komentar: Če presežemo nazivno moč P_n , temperatura elementa preseže maksimalno temperaturo T_{max} in sledi degradacija oz. uničenje elementa.

Pri tem je maksimalna temperatura T_{max} najvišja temperatura, ki jo materiali v elementu še prenesejo brez degradacije. Tipična vrednost T_{max} pri navadnih uporih je okrog 150°C , pri močnostnih uporih, ki so iz kvalitetnejših, temperaturno odpornih materialov, pa 250°C in več.

Za nazivno moč elementa P_n srečamo v praksi tudi druga imena, kot npr. maksimalna dopustna moč, maksimalna moč segrevanja (maximal power dissipation) itd.

1. Razmere v obremenjenem uporu

Razmere v obremenjenem uporu prikazuje Sl 2.4. V obremenjenem uporu se sprošča električna moč, ki povzroči segrevanje upora in je določena z električnim tokom I oz. napetostjo V na elementu

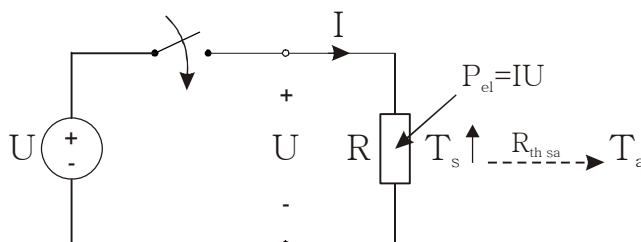
$$P_{segr} = V I \quad (2.5)$$

Zato se upor po priključitvi električne obremenitve segreva in njegova površinska (surface) temperatura T_s raste. Če obremenjeni upor toplote ne bi oddajal, bi njegova temperatura neomejeno rasla. To seveda ne drži, obremenjeni upor torej toploto tudi stalno oddaja. Oddajanje toplote poteka na dva načina, s prevajanjem in s sevanjem. Oba načina oddajanja toplote sta proporcionalna temperaturni razliki $T_s - T_a$, zato lahko oddano toplotno moč P_{odd} zapišemo v obliki

$$P_{odd} = \frac{T_s - T_a}{R_{thsa}} \quad (2.6)$$

kjer je konstanta proporcionalnosti imenovana termična upornost (thermal resistance) med tema točkama R_{thsa} . Termična upornost R_{th} nekega upora podaja termične lastnosti upora oz. učinkovitost odvajanja sproščane toplote od upora v okolico. Enota termične upornosti je $[\text{C}/\text{W}]$. Termična upornost torej številčno podaja število watov, ki jih element oddaja v okolico pri temperaturni razliki 1°C .

Dodajmo še, da temperatura okolice oz. ambienta T_a v praksi običajno ni enaka sobni temperaturi (okrog 25°C) temveč je nekoliko višja, ker se elementi ponavadi nahajajo zaprti v ohišju neke naprave, kjer je temperatura povišana zaradi različnih sproščanih moči. Tipične vrednosti temperature ambienta T_a so tako v intervalu $50 - 90^\circ\text{C}$.



SI 2.4 Razmere v obremenjenem uporu

2. Termično ravnovesje

Po vklopu električne obremenitve oz. segrevanja $P_{\text{segr}} = VI = \text{const}$ se element začne segrevati, njegova temperatura raste T_s , s tem pa, kot smo videli, narašča tudi oddajanje toplote, kot podaja en(2.6). Ko temperatura naraste toliko, da postane oddana moč P_{odd} enaka prejeti električni moči segrevanja $P_{\text{segr}} = VI$, element torej v vsakem trenutku dobi enako moč kot jo odda, zato se temperatura ne spreminja več oz. se stabilizira ($T_s = \text{const}$). Pravimo, da je nastopilo termično ravnovesje.

V termičnem ravnovesju torej velja

$$P_{\text{segr}} = P_{\text{odd}} = \frac{T_s - T_a}{R_{\text{thsa}}} \quad (2.7)$$

En(2.7) podaja zvezo med osnovnimi veličinami problema: $P_{\text{segr}} (= VI)$, T_s , T_a , R_{thsa} .

Osvetlimo povedano z enostavnim a pogostim primerom iz prakse !

Primer: Obremenjen električni element vleče pri napetosti 5V tok 1A. Termična upornost elementa znaša $R_{\text{thsa}} = 10^\circ\text{C}/\text{W}$. Temperatura ambienta je 70°C . Določi (stabilizirano) temperaturo elementa T_s !

Rešitev: Električna moč segrevanja je v tem primeru torej $P_{\text{segr}} = VI = 5\text{V} \cdot 1\text{A} = 5\text{W}$. Iz en(2.7) izrazimo stabilizirano temperaturo elementa T_s

$$\begin{aligned} T_s &= T_a + R_{\text{thsa}} P_{\text{segr}} \\ &= 70^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C}/\text{W} \cdot 5\text{W} \\ &= 70^\circ\text{C} + 50^\circ\text{C} = \underline{120^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Povišana temperatura obremenjenega elementa se torej v danih razmerah ustali na 120°C .

3. Nazivna moč

Nazivno moč lahko določimo s pomočjo en(2.7) ob upoštevanju definicije, da je nazivna moč tista moč segrevanja, pri kateri element ravno doseže maksimalno dopustno tempe ($T_s =$

T_{\max}). Torej, če vstavimo omenjene vrednosti v en(2.7), dobimo izraz za nazivno moč

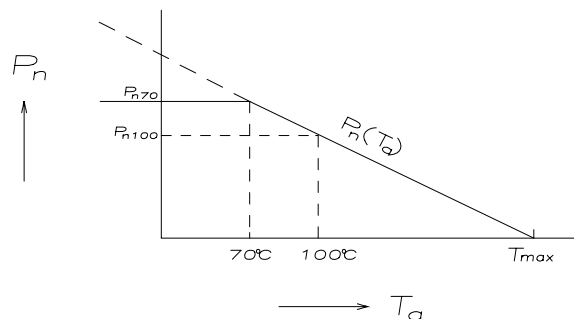
$$P_n = \frac{T_{\max} - T_a}{R_{thsa}} \quad (2.9)$$

Nazivna moč P_n je torej določena z lastnostmi elementa (T_{\max} , R_{thsa}) in ambienta (T_a).

Nazivno moč lahko povečamo, če v skladu z en(2.9) uspemo povišati T_{\max} (temperaturno odpornejši materiali omogočajo višje temperature in s tem večje odvajanje moči), znižamo T_a (večja temperaturna razlika in s tem večje odvajanje sproščane moči oz. toplote) ali znižamo R_{thsa} (boljše odvajanje sproščane moči oz. toplote).

Iz en(2.9) torej vidimo, da je nazivna moč odvisna vedno tudi od temperature ambienta T_a , v katerem se nahaja delujoči element. Zato morajo proizvajalci pri podatku za nazivno moč P_n vedno podati tudi, za katero temperaturo ambienta to velja! Običajno proizvajalci podajajo nazivno moč za temperaturo ambienta $T_a = 70^\circ\text{C}$.

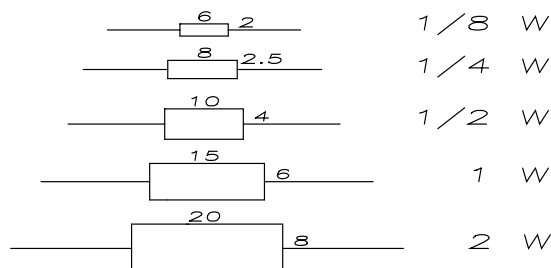
Odvisnost nazivne moči P_n od temperature ambienta T_a , v skladu z en(2.9), prikazuje črtkana premica na Sl 2.5. V praksi se pogosto zgodi, da je temperatura ambienta pri neki aplikaciji elementa različna (višja ali nižja) od specificirane v proizvajalčevem katalogu. V tem primeru se mora spremeniti seveda tudi podatek za nazivno moč, v skladu z grafom na Sl 2.5. Pri višjih oz. nižjih temperaturah ambienta od proizvajalčeve vrednosti za T_a je torej treba nazivno moč zmanjšati oz. povečati. Vseeno pa proizvajalci zaradi varnosti moči pod $T_a = 70^\circ\text{C}$ običajno ne dopustijo neomejeno povečevati, kot prikazuje tipičen graf nazivne (maksimalne dopustne) moči v odvisnosti od temperature ambienta (polna črta) na Sl 2.5.



Sl 2.5 Nazivna moč v odvisnosti od temperature ambienta

4. Razdelitev uporov glede na moč

a) **Upori za manjše moči** ($P_n = 0.1 \div 1W$) so običajni upori manjših dimenzij. Na Sl 2.6 je prikazana zveza med standardnimi dimenzijami uporov (premer,dolžina) in pripadajočo nazivno močjo pri cilindričnih uporih.



Sl 2.6 Dimenzije upora(dolžina, premer) v [mm] in pripadajoče moči pri cilindričnih uporih

b) **Upori za večje moči** ($P_n = 1 \div 100W$ in več) so upori večjih dimenzij, iz temperaturno odpornejših materialov, kar omogoča višje maksimalne temperature in s tem višje maksimalne moči segrevanja oz. nazivne moči.

Poleg tega je za zelo velike moči poskrbljeno za boljše odvajanje toplote na enega od sledečih načinov :

1) **Hladilno telo** : Vroča površina elementa, ki oddaja toploto, je lahko dodatno povečana s ti. hladilnim telesom. Hladilno telo mora biti v dobrem termičnem kontaktu z elementom, tako da se njegova površina segreje (skoraj) do temperature vročega elementa in se tako učinkoviteje odvaja toploto od elementa v okolico. Hladilno telo mora imeti pri dani porabi volumna v napravi čim večjo površino, zato gre tu za značilne strukture s hladilnimi rebri. Večja vroča površina povzroči večje odvajanje toplote, kar opišemo v skladu z en(2.7) z nižjo termično upornostjo. Termična upornost je torej v obratnem sorazmerju z vročo površino, kar zapišemo v obliki

$$R_{thsa} = \frac{l}{\sigma A} \quad (2.10)$$

kjer je $A [cm^2]$... celotna vroča površina, ki oddaja toploto (element,hladilno telo itd.)
 $\sigma [W/^\circ Ccm^2]$... konstanta toplotne izmenjave; podaja število wатов, ki jih odvede $1cm^2$ vroče površine pri temperaturni razliki $T_s - T_a = 1^\circ C$. Včasih srečamo namesto konstante σ konstanto α , ki jo imenujemo specifična toplotna prestopnost upor/okolica.

V gornjih enačbah se torej zaradi dodatka hladilnega telesa zniža termična upornost, kar vodi v skladu z en(2.10) tudi do višjih nazivnih moči.

2) **Pojačano hlajenje** : obstoja več pristopov, glede na hladilno sredstvo ločimo:

- zračno hlajenje, ki ga lahko še dodatno pospešujemo z ventilatorji
- tekočinsko hlajenje, kjer v zaprtem hladilnem sistemu kroži primerna hladilna tekočina (destilirana voda, mineralna ali silikonska olja itd.), ki na oddaljenih toplotnih izmenjevalcih odlaga odvečno toploto v okolico

5. Analogija med elektrotehničskimi in termičnimi problemi

Do enačbe en(2.10) pridemo lahko tudi s pomočjo analogije, ki zaradi podobnih izhodiščnih diferencialnih enačb vlada med problemi elektrotehnike in termike :

ELEKTROTEHNIKA	TERMIKA
ΔV_{ab}	ΔT_{ab}
I	P
R_{ab}	R_{thab}
C	C_{th}
itd	itd

Ob ustrezni zamenjavi veličin se izkaže, da je zapisana enačba en(2.10) za oddajanje toplote pravzaprav termična analogija Ohmovega zakona : toplotna moč P oz. električni tok I, ki teče med dvema točkama, označimo jih npr. (s,a), po nekem toplotnem ali električnem vodniku, je proporcionalen temperaturni oz. potencialni razliki med tema dvema točkama ($T_s - T_a$ oz. $V_s - V_a$) in obratno sorazmeren termični oz. ohmski upornosti R_{thsa} oz. R_{sa} med tema dvema točkama. Opisana analogija pride do izraza zlasti pri bolj kompliciranih termičnih problemih kot npr. pri prehodnih pojavih segrevanja ali ohlajanja itd.

2.2.5 NESTABILNOST UPOROV

Nestabilnost elementa podaja spremembo lastnosti elementa po dolgoletnem delovanju. Tako je npr. nestabilnost upora podana z izrazom

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_t = \frac{R_t - R_0}{R_0} \quad (2.11)$$

kjer je R_t spremenjena upornost po dolgoletnem delovanju t, R_0 pa začetna upornost upora ob izdelavi.

Pogosto srečamo v praksi namesto imena nestabilnost tudi druga imena kot npr. degradacija ali staranje elementa, včasih pa tudi (manj logično) stabilnost elementa.

1. Izvor nestabilnosti

Zaradi povišanih temperatur v obremenjenem uporu pride po dolgoletnem delovanju do sprememb upornosti. Vzrok za to časovno spreminjanje upornosti je degradacija uporabne plasti(Pogl. 1).

Te nezaželene spremembe upornosti so tem manjše, čim kvalitetnejši oz. stabilnejši so materiali v uporabi in čim nižja je temperatura upora T_s . Temperatura upora T_s je določena, v skladu z en(2.9), z električno obremenitvijo $P_{\text{segr}} = VI$ in s temperaturo ambienta T_a .

Zaradi eksponentne odvisnosti degradacijskih procesov od temperature (Pogl.1) je zveza med degradacijo upornosti $\Delta R/R$ in temperaturo upora T_s linearna v log merilu, konstanto proporcionalnosti označimo z $K(R)$

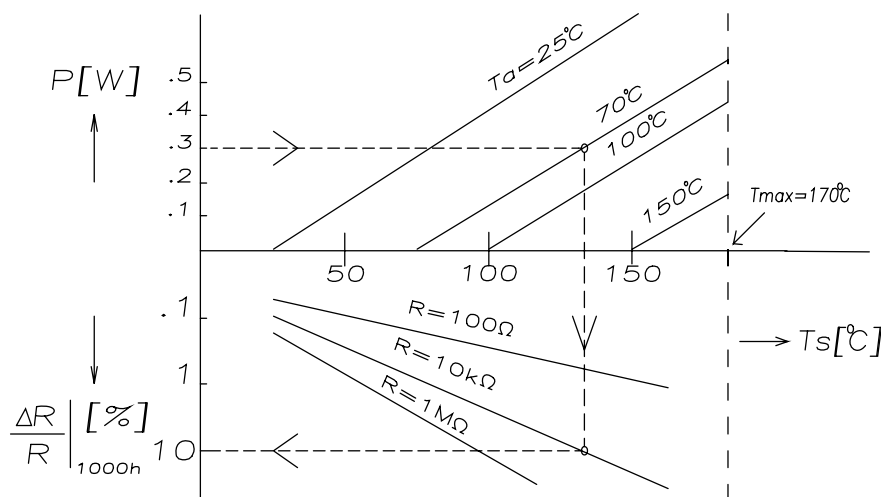
$$\log \frac{\Delta R}{R} = K(R) T_s \quad (2.12)$$

Konstanta $K(R)$ je običajno odvisna od velikosti upornosti. V splošnem imajo namreč pri neki družini uporov, narejenih z isto tehnologijo, nizkoohmski upori večjo stabilnost kot visokoohmski. Vzrok je v dejstvu, da imajo nižjeohmski upori debelejšo uporovno plast, ki so bolj odporne proti opisanemu efektom degradacije kot tanke in zato občutljive plasti višjeohmskih uporov. Osvetlino povedano z enostavnim primerom.

Primer: Pri neki uporovni družini imajo nižjeohmski upori uporovno plast debelino $100\mu\text{m}$, višjeohmski pa $1\mu\text{m}$. Če je zaradi degradacije uporovna plast stanjšana za $0.1\mu\text{m}$, bo pri višjeohmskih uporih upornost zrasla za 10% , pri nižjeohmskih pa le za 0.1% !

2. Nomogram upornosti

Nestabilnost neke uporovne družine podajajo proizvajalci največkrat grafično s ti. nomogramom oz. večparametrskim diagramom. Pri tem gre običajno za podajanje izmerjene relativne spremembe upornosti $\Delta R/R$ pri različnih električnih obremenitvah $P=VI$ oz. povišanih temperaturah upora T_s , po nekem daljšem času delovanja (običajni standard je 1000^{h}) ter včasih še nekaterih dodatnih pogojih delovanja (npr. povišana vlaga η , itd.). Primer takega nomograma prikazuje sl.7.



SI 2.7 Nomogram nestabilnosti: zveza med močjo obremenitve $P = VI$, temperaturami T_s , T_a , T_{max} in degradacijo $\Delta R/R$

Primer : S pomočjo nomograma na Sl 2.7 oceni degradacijo upora $\Delta R/R$ po 1000^h delovanja za upor $R = 10k\Omega$, pri električni obremenitvi $P = 0.3W$ in pri temperaturi ambienta $T_a = 70^{\circ}C$! Določi še degradacijo za primer znižane električne obremenitve $P = 0.1W$!

Rešitev: Iz nomograma na Sl 2.7 odčitamo pri gornjih podatkih po poti, ki jo prikazuje črtkana krivulja, rezultat : $\Delta R/R = +10\%$! Iz diagrama lahko mimogrede ocenimo še en zanimiv podatek, temperaturo upora : $T_s = 130^{\circ}C$.

Podobno za primer znižane obremenitve $P = 0.1W$ iz nomograma ocenimo $T_s = 100^{\circ}C$ in degradacijo $\Delta R/R = +1\%$! Degradacija se torej pri 3x nižji moči zniža za razred velikosti !

3. Degradacija po poljubnem času delovanja

Običajno nas zanima v praksi sprememba upornosti po daljšem ali krajšem časovnem obdobju delovanja, kot je omenjeni standard 1000^h delovanja. Ob upoštevanju korenske časovne odvisnosti degradacijskih procesov (Pogl.1) lahko degradacijo za poljuben čas enostavno določimo iz vrednosti degradacije za 1000^h po enačbi

$$\frac{\Delta R}{R} /_t = \frac{\Delta R}{R} /_{1000^h} \sqrt{\frac{t}{1000^h}} \quad (2.13)$$

4. Znižanje degradacije

Če ocenjena časovna degradacija oz. nestabilnost ΔR po en(2.13) za predpisano obdobje delovanja presega dopustno, ki je zahtevana za pravilno delovanje vezja, je potrebno v skladu z nomogramom na Sl 2.7 ali znižati električno obremenitev P in s tem temperaturo elementa T_s , ali znižati temperaturo ambienta T_a (hladilno telo, ventilator,..), ali pa izbrati kvalitetnejšo, stabilnejšo vrsto upora (nižji K)!

2.2.6 NAZIVNA NAPETOST, MEJNA NAPETOST, KRITIČNA UPORNOST

Pri neki družini uporov je do neke ti. kritične upornosti R_c maksimalna dopustna oz. nazivna (nominal) napetost V_n , ki jo upor še prenese brez degradacije, določena, kot smo videli, s termičnimi omejitvami oz. z nazivno močjo P_n

$$P_n = V_n I_n = \frac{V_n^2}{R_n} = I_n^2 R_n \quad (2.14)$$

Iz znane nazivne moči in upornosti lahko tako izračunamo maksimalno dopustno napetost oz. nazivno napetost upora V_n

$$V_n = \sqrt{P_n R_n} \quad R_n < R_c \quad (2.15)$$

Izkaže se, da za nazivne upornosti nad kritično upornostjo R_c gornja omejitev napetosti ni ustrezna. Pri zelo visokih upornostih R_n , nad kritično upornostjo R_c , bi namreč tako izračunane nazivne napetosti dobile nerealno visoke vrednosti. Zato bi prišlo prej, še preden bi dosegli to nazivno napetost in s tem dosegli termične omejitve oz. maksimalno dopustno temperaturo upora T_{max} , do preboja na uporu!

Torej, pri visokih upornostih nad kritično upornostjo pri neki uporabni družini maksimalna dopustna napetost ni omejena s termičnimi lastnostmi ampak s prebojnimi omejitvami. Ustrezni maksimalni napetosti, ki jo upor še prenese brez preboja, pravimo mejna (limit) napetost V_L . Včasih proizvajalci podajo namesto mejne napetosti V_L kar kritično upornost, pri kateri se zgodi za dano družino uporov prehod od termičnih omejitev na prebojne. Tedaj mejno napetost izračunamo lahko po gornji enačbi ob upoštevanju enakosti $R_n = R_c$

$$V_L = \sqrt{P_n R_c} \quad R_n > R_c \quad (2.16)$$

Ugotovljena napetostna omejitev velja dovolj dobro tudi dalje, za višje upornosti nad R_c . Kritična upornost R_c je odvisna od strukture uporov, zlasti od prebojnih lastnosti oz. dielektrične trdnosti pasivacijskih materialov upora ter njihovih debelin, širine reza pri rezkanih (spiraliziranih) uporih itd.

Zaključek: Torej, napetostne omejitve na uporih pri neki uporabni družini so določene s termičnimi lastnostmi oz. nazivno napetostjo V_n pod kritično upornostjo R_c , nad kritično upornostjo R_c pa s prebojnimi lastnostmi oz. mejno napetostjo V_L !

2.2.7 IMPULZNO KRMILJENJE UPORA

Uvod

Pri obravnavi električne obremenitve in segrevanja oz. termičnih omejitev upora smo spoznali nazivno moč P_n . Ponovimo: nazivna moč P_n je tista maksimalna moč, pri kateri upor ravno doseže maksimalno dopustno temperaturo T_{max} .

Pri krmiljenju upora z enosmernimi signali torej velja

$$P_n = V_n I_n = I_n^2 R_n = \frac{V_n^2}{R_n} \quad (2.17)$$

Podobne zveze lahko zapišemo tudi pri krmiljenju s harmoničnimi signali, le enosmerne vrednosti moramo nadomestiti z efektivnimi.

Prekoračitev nazivnih vrednosti moči, napetosti ali toka P_n , V_n ali I_n ima torej za posledico vedno prekoračitev maksimalne dopustne temperature T_{max} in s tem uničenje upora!

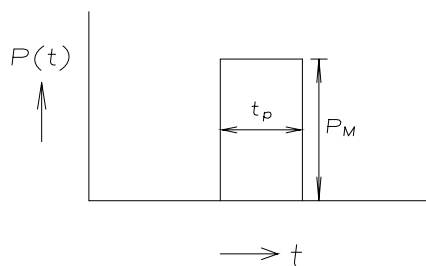
Pri impulznem krmiljenju elementa pa se izkaže, da lahko trenutne vrednosti moči, napetosti ali toka zrastejo kratkotrajno na višje vrednosti od nazivnih vrednosti P_n , V_n , I_n , pa bo upor preživel brez degradacije, če je le izpolnjen pogoj, da srednja (povprečna) moč impulzov ne presega nazivne moči P_n ! Temperatura upora T_s je namreč v tem primeru še vedno pod maksimalno dopustno temperaturo T_{max} in degradacije ni.

V praksi srečamo dve vrsti impulznega krmiljenja: krmiljenje z enkratnim impulzom in krmiljenje s periodičnimi impulzi!

Včasih lahko obravnavamo tudi krmiljenje s periodičnimi impulzi kot enkratni impulz - kadar je čas med dvema zaporednima impulzoma dovolj dolg, da se upor do prihoda naslednjega impulza že ohladi. Ponavljalna frekvenca impulzov mora biti torej dovolj nizka, tipično $f < 0.5$ Hz oz. pod 1500 impulzov/h.

1. Krmiljenje z enkratnim impulzom

Na SI 2.8 je prikazan časovni potek moči na uporu pri enkratnem impulzu, dolžine t_p in moči P_M .



SI 2.8 Časovni potek moči pri enkratnem impulzu

Če poznamo električne in termične karakteristike upora, je možno teoretično izračunati, lahko pa tudi eksperimentalno izmeriti, kakšna je za dano trajanje enkratnega impulza t_p tista maksimalna moč impulza P_M , ki jo upor še prenese brez degradacije. Med obema vrednostima seveda vlada obratno sorazmerje: če P_M zraste, mora t_p upasti, in obratno. Izkaže se, da zvezo med obema količinama lahko običajno zapišemo v obliki

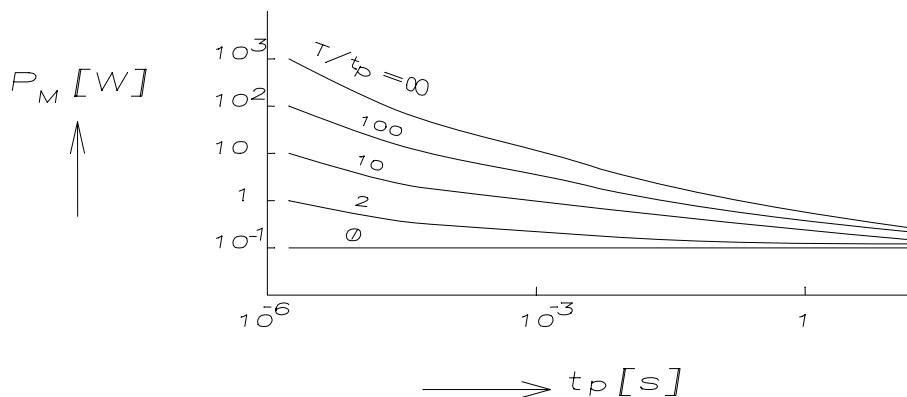
$$P_m = C / t_p^K$$

oziroma v logaritemski obliki

$$\log P_M \cong -K \log t_p + \log C \quad (2.18)$$

Po gornji enačbi je zveza med P_M in t_p v log-log diagramu premica, medtem ko izmerjene vrednosti od tega rahlo odstopajo. Izmerjene vrednosti dajejo običajno nižje vrednosti za maksimalne dopustne moči impulza. Razlog je v hitrejši degradaciji zaradi lokalnih segrevanj, ki jih srečamo pri hitrih spremembah signalov v uporu na raznih nehomogenostih uporovnih in metalizacijskih plasti, ostrih robovih, konicah itd.

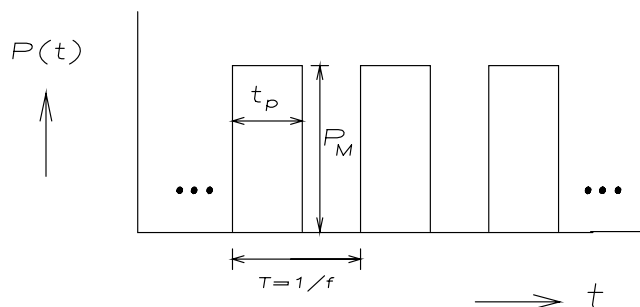
Diagram na Sl 2.9 prikazuje tipično zvezo med maksimalno dopustno močjo P_M in dolžino enkratnega impulza t_p (gornja krivulja, za $T/t_p = \infty$!). V skladu s podano enačbo maksimalna dopustna moč impulza P_M upada z dolžino impulza t_p in za dolge čase limitira proti nazivni moči $P_n = 0.1W$ za ta primer, kar je smiselen rezultat.



Sl 2.9 Maksimalna dopustna moč impulza P_M v odvisnosti od dolžine impulza t_p ($P_n=0.1W$)

2. Krmiljenje s periodičnimi impulzi

Na Sl 2.10 je prikazan časovni potek moči na upor pri periodičnih impulzih, s ponavljalno dobo (periodo) T oz. frekvenco $f = 1/T$.



Sl 2.10 Časovni potek moči pri periodičnih impulzih

Tudi tu je osnovna zahteva za dobro delovanje elementa brez degradacije, da mora biti temperatura elementa T_s vedno nižja od maksimalne temperature T_{max}

$$T_s < T_{max} \quad (2.19)$$

To pomeni, da se element pri impulzni obremenitvi s P_M v trajanju t_p ne sme segreti bolj kot pri enosmerni obremenitvi z nazivno močjo P_n .

Podobno kot smo videli že pri enkratnem impulzu, lahko tudi za periodične impulze teoretično ali eksperimentalno določimo zveze med osnovnimi veličinami. Zvezo med maksimalno močjo P_M in trajanjem impulza t_p proizvajalci običajno podajajo grafično kot parametričen šop krivulj, kjer nastopa kot parameter razmerje med ponavljalno dobo in trajanjem impulza T/t_p (Sl 2.9). Zgornja krivulja ($T/t_p = \infty$) predstavlja limitni primer $T \rightarrow \infty$, torej enkratni impulz. Spodnja krivulja ($T/t_p = 0$) predstavlja limitni primer $t_p \rightarrow \infty$, torej neskončno dolg impulz oz. konstanten (enosmerni) impulz, z nazivno močjo P_n .

Osvetlino problem krmiljenja upora s periodičnimi impulzi z enostavnim primerom.

Primer: S pomočjo diagrama na s SI 2.9 določi maksimalno dopustno moč P_M za periodične impulze z dolžino $t_p = 1\text{ms}$ in ponavljalno dobo $T = 100\text{ms}$!

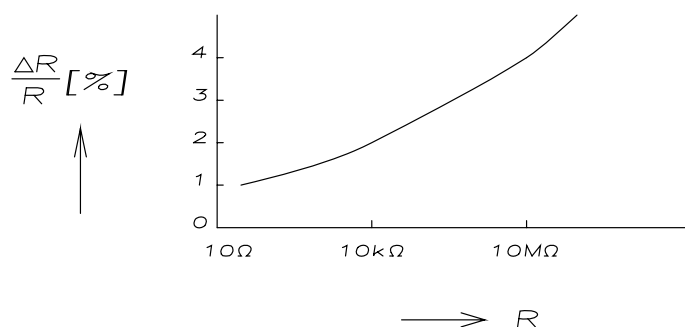
Rešitev: V našem primeru torej velja $T/t_p = 100$ in iz diagrama na SI 2.9 ocenimo pri $t_p = 1\text{ms}$ maksimalno dopustno moč $P_M = \underline{5W}$!

Opomba: V primeru izredno kratkih, strmih in visokih impulzov je treba dodatno paziti, ker lahko pride do močnih lokalnih segrevanj in lahko temperatura lokalno preseže maksimalno dopustno temperaturo T_{\max} , čeprav srednja moč v tem primeru še ne preseže nazivne moči P_n ! Zato običajno proizvajalci podajajo še dodatne omejitve glede teh kratkotrajnih visokih impulzov ali sunkov z vrednostmi P_{\max} , V_{\max} , I_{\max} , ki v nobenem primeru ne smejo biti presežene, tudi kratkotrajno ne !

2.2.8 STANDARDNE OBREMENITVE

Tovarne podajajo pogosto za svoje upore tudi izmerjene relativne spremembe upornosti $\Delta R/R$ pri različnih standardnih obremenitvah. Ti podatki omogočijo oceno kvalitete in stabilnosti posameznih elementov ter primerjavo med različnimi proizvajalci.

Tipičen potek relativne spremembe upornosti v odvisnosti od nazivne upornosti neke uporovne družine prikazuje diagram na SI 2.11. Z naraščajočo vrednostjo upornosti v splošnem relativne spremembe upornosti rastejo. Vzrok je v dejstvu, da zahtevajo v splošnem visokohmski upori tanjše plasti, ki so bolj občutljive in se relativno hitreje spreminjajo, kot je to primer pri debelejših plasteh nizkohmskih uporov.



SI 2.11 Tipična sprememba upornosti pri obremenitvi neke uporovne družine

Navedimo tri pogostejše vrste obremenitev :

1. Električna obremenitev: $T_a = 70^\circ\text{C}$, P_n , $t = 1000^{\text{h}}$

2. Temperaturna obremenitev: $T_a = 155^\circ\text{C}$, $t = 1000^{\text{h}}$

3. Obremenitev z vlago: $T_a = 40^\circ\text{C}$, $\eta = 95\%$, $t = 56$ dni

Tipične relativne spremembe upornosti (SI 2.11) po gornjih standardnih obremenitvah so v razredu nekaj % za srednje kvalitetne upore (bolj podrobno kasneje pri obravnavi lastnosti posameznih družin!).

2.2.9 TEMPERATURNI KOEFICIENT UPORNOSTI

Uporovne lastnosti resničnih materialov se spreminjajo s temperaturo. Zato so tudi upornosti resničnih uporov odvisne od temperature.

Temperaturne lastnosti elementov in materialov podajamo s temperaturnimi koeficienti (TC, tudi TK ali včasih α). Temperaturni koeficient TC ima ponavadi dodan še indeks, ki podaja veličino, katere temperaturno odvisnost koeficient opisuje, npr. temperaturni koeficient upornosti TC_R .

Temperaturni koeficienti so največkrat definirani kot razmerje relativne spremembe opazovane veličine in ustrezne spremembe temperature. Temperaturni koeficient upornosti TC_R je tako običajno zapisan v eni izmed naslednjih oblik

$$TC_R = \frac{\frac{dR}{R}}{dT} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{d \ln R}{dT} \quad (2.20)$$

1. Uporovne lastnosti materialov

Če upornost materiala ali elementa s temperaturo raste, je po en(2.20) temperaturni koeficient pozitiven in govorimo o PTC materialu ali elementu. Če upornost s temperaturo pada, je temperaturni koeficient negativen in govorimo o NTC materialu ali elementu.

Predznak in velikost temperaturnega koeficienta sta odvisna predvsem od materiala uporovne plasti, v praksi pa včasih še od drugih, manj pričakovanih parametrov kot npr. od debeline uporovne plasti - ker pri tanjši plasti pridejo bolj do izraza površinski efekti proti volumskim kot pri debelejši plasti itd.

Uporovne lastnosti raznih (ne)prevodnih materialov se s temperaturo spreminjajo zaradi različnih pojavov, ki vplivajo na mobilnost prostih nosilcev naboja μ ali njihovo koncentracijo n in s tem na specifično upornost ρ oz. prevodnost σ , v skladu z enačbo

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = q \mu n \quad (2.21)$$

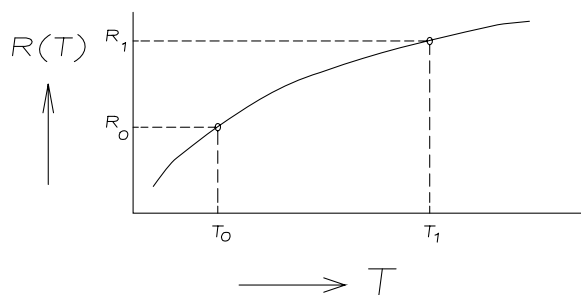
V materialih z znano strukturo se dodatno z naraščajočo temperaturo spreminjajo, običajno izboljšujejo oz. nižajo, kontaktne upornosti med zni materiala.

Omenimo nekaj osnovnih efektov, ki določajo temperaturni koeficient v nekaterih materialih in uporih:

- z naraščajočo temperaturo upada mobilnost zaradi naraščajočega števila trkov in upornost raste (PTC) ! Tipičen predstavnik tega efekta so kovine in upori s tankimi kovinskimi plastmi.
- z naraščajočo temperaturo upada kontaktna upornost med zrni materiala in upornost pada (NTC) ! Tipičen predstavnik tega efekta so ogljenoplastni upori.
- z naraščajočo temperaturo raste koncentracija prostih nosilcev zaradi večjih razpoložljivih energij in upornost pada (NTC) ! Tipičen predstavnik tega efekta so polprevodniški materiali in polprevodniški upori.

2. Temperaturna odvisnost upornosti

Pri običajnih (linearnih oz. ohmskih) uporih so temperaturne odvisnosti upornosti majhne, spreminjanje upornosti s temperaturo $R(T)$ je počasno (SI 2.12).



SI 2.12 Tipična odvisnost upornosti ohmskega upora od temperature

Tedaj lahko za opis temperaturnih lastnosti uporabimo razvoj v Taylorjevo vrsto okrog izhodiščne (referenčne) temperature T_0 (običajno 25°C)

$$R(T) = R(T_0) + \frac{dR}{dT}\bigg|_{T_0} (T - T_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2R}{dT^2}\bigg|_{T_0} (T - T_0)^2 + \dots \quad (2.22)$$

Pri običajnih ohmskih uporih višji členi Taylorjeve vrste upadajo po velikosti proti 0, zaradi relativno majhnih sprememb upornosti s temperaturo. Zato lahko temperaturno odvisnost upornosti običajno dobro opišemo, če obdržimo le prve tri člene

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha_R (T - T_0) + \beta_R (T - T_0)^2] \quad (2.23)$$

kjer je $R_0 = R(T_0)$... referenčna (tudi: nazivna) upornost

$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}\bigg|_{T_0}$... linearni člen oz. koeficient, ki podaja naklon premice

$$\beta_R = \frac{1}{2R} \frac{d^2 R}{dT^2} / T_0 \quad \dots \quad \text{kvadratni člen oz. koeficient, ki podaja ukrivljenost krivulje}$$

Pri dobrih ohmskih uporih je temperaturna variacija upornosti majhna, zato je v relativno ozkem intervalu delovanja upora okrog sobnih temperatur krivulja $R(T)$ precej podobno premici in zadošča linearen opis (kvadratni člen je zanemarljiv, $\beta_R = 0$)

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha_R (T - T_0)] = R_0 (1 + \alpha_R \Delta T) \quad (2.24)$$

Tabela 1 podaja specifične upornosti in temperaturne koeficiente nekaterih prevodnih in uporovnih materialov. Enota specifične upornosti ρ je izbrana tako, da številčna vrednost podaja kar upornost v $[\Omega]$, ki jo ima 1m dolga žica s presekom 1mm^2 .

Tabela 3 Specifična upornost in temperaturni koeficient ($T = 20^\circ\text{C}$)

Material	$\rho[\Omega\text{mm}^2/\text{m}]$	$\text{TC}_R[10^{-6}/^\circ\text{C}]$
Cu	0.017	+4300
Al	0.028	+4200
Au	0.024	+3800
Ni	0.075	+6500
NiCr 80/20	1.0	+100
C	40	-200

2.2.10 PLASTNA UPORNOST

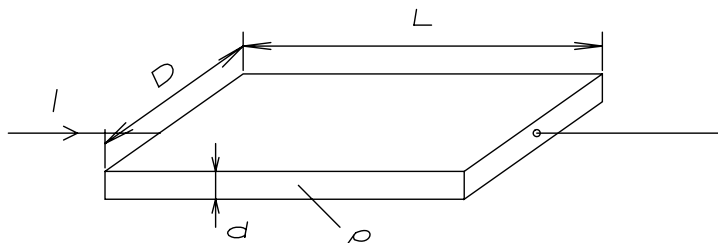
V praksi največkrat srečamo upore, pri katerih je uporovno področje izvedeno v obliki tanke uporovne plasti na primerni podlagi (substratu). Izkaže se, da je v tem primeru najprimerneje za karakterizacijo uporovne plasti in upora samega vpeljati pojem plastne upornost R_{sh} (sheet-plast). Glavni razlog za to je v izredno hitri, enostavni, natančni in nedestruktivni meritvi plastne upornosti, kot bo prikazano na koncu poglavja, medtem ko bi morali za direktno karakterizacijo uporovne plasti izvesti zahtevne, zamudne, manj točne in destruktivne meritve specifične upornosti in debeline tanke uporovne plasti.

Pojem plastne upornosti zato pogosto srečujemo v elektroniki, zlasti pri karakterizaciji klasičnih in mikroelektronskih tehnologij kakor tudi pri načrtovanju uporov.

Pojem plastne upornosti si bomo ogledali v dveh praktično pomembnih primerih, homogene in nehomogene uporovne plasti (homogen - lastnosti materiala so v vsaki točki enake oz. konstantne!).

1. Homogena uporovna plast: $\rho = \text{const}$

Razmere v obravnavani uporovni progi dolžine L , širine D , debeline d in specifične upornosti ρ , po kateri teče električni tok I , prikazuje SI 2.13.



SI 2.13 Razmere v homogeni uporovni progi

Upornost uporovne proge na, ki jo čuti tok I , je določena s specifično upornostjo ρ , širino D , debelino d in dolžino L uporovne proge

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{Dd} = \frac{\rho}{d} \frac{L}{D} \quad (2.25)$$

En(2.25) smo preuredili s tem, da smo združili skupaj lastnosti uporovne plasti (ρ/d) in geometrijske lastnosti plasti (L/D).

Plastno upornost R_{sh} dane uporovne plasti definiramo kot razmerje (ρ/d)

$$R_{sh} = \frac{\rho}{d} \quad (2.26)$$

Hitro lahko ugotovimo, da je tako definirana plastna upornost R_{sh} tudi enaka upornosti enega kvadratka uporovne plasti: če za uporovno progo na SI 2.13 vzamemo $L = D$, torej uporovno progo kvadratne geometrije, je upornost tega kvadratka R_{\square} , podobno kot v prejšnjem primeru

$$R_{\square} = \rho \frac{L}{A} = \frac{\rho D}{Dd} = \frac{\rho}{d} = R_{sh} \quad (2.27)$$

Alternativna definicija oz. predstava plastne upornosti se torej glasi: plastna upornost R_{sh} dane plasti je upornost enega kvadratka (poljubne stranice) te plasti!

Dimenzija plastne upornosti, kot to sledi iz definicije, je $[\Omega]$. Včasih zaradi nazornosti dodamo še brezdimenzijski simbol kvadratka $[\Omega/\square]$.

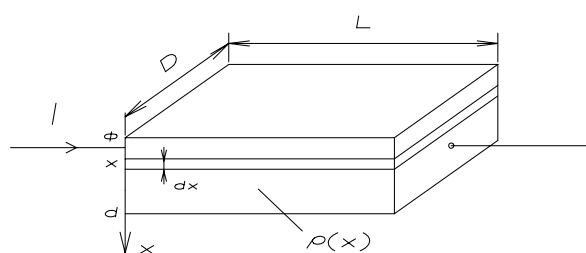
Zvezo med upornostjo danega upora, plastno upornostjo in geometrijo lahko tako zapišemo s pomočjo gornjih enačb v obliki

$$R = R_{sh} \frac{L}{D} \quad (2.28)$$

Razlaga pomena en(2.28) je naslednja: če si predstavljamo neko uporovno progo razdeljeno na kvadratke (npr. Sl 2.17), podaja razmerje L/D število kvadratkov v uporovni progi. V tem smislu razumemo tudi en(2.28): upornost neke uporovne proge je enaka plastni upornosti R_{sh} (ki predstavlja upornost enega kvadratika), pomnoženi s številom kvadratkov v tej uporovni progi (L/D)!

2. Nehomogena uporovna plast : $\rho \neq \text{const}$

V tem primeru se specifična upornost po volumnu materiala spreminja. Tipičen primer take nehomogene uporovne plasti je difundirani upor v monolitnih integriranih vezjih, kjer koncentracija prostih nosilcev naboja in s tem prevodnost plasti od površine v globino upada. Izkače se, da tudi v primeru nehomogene uporovne plasti uporabnost pojma plastne upornosti ostane neokrnjena!



Sl 2.14 Razmere v nehomogeni uporovni plasti

Razmere v nehomogeni uporovni plasti prikazuje Sl 2.14. Specifična upornost ρ oz. prevodnost σ se sedaj spreminjata s koordinato x . Za izračun upornosti si moramo sedaj predstavljati upor razrezan na tako tanke plasti, da je sprememba specifične upornosti znotraj posamezne plasti zanemarljiva in lahko prevodnost dG posamezne tanke plasti debeline dx enostavno zapišemo v obliki

$$dG = \sigma(x) \frac{D dx}{L} \quad (2.29)$$

Celotno prevodnost upora G oz. upornost R dobimo, ker so plasti vezane paralelno, s seštevanjem prevodnosti posameznih plasti oz. z integracijo

$$R = \frac{L}{G} = \frac{L}{\int_0^d \sigma(x) dx} \frac{L}{D} \quad (2.30)$$

Če definiramo plastno upornost nehomogene plasti kot

$$R_{sh} = \frac{L}{\int_0^d \sigma(x) dx} = \frac{\bar{\rho}}{d} \quad (2.31)$$

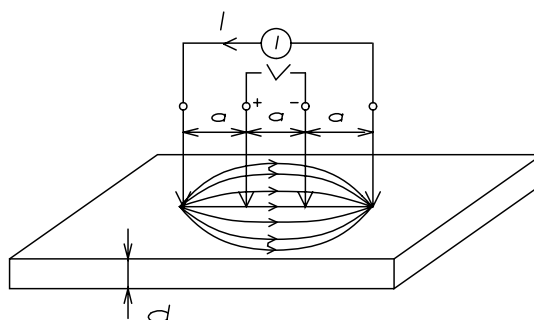
kjer je $\bar{\rho}$ povprečna specifična upornost, lahko enako kot pri homogeni plasti zapišemo

$$R = R_{sh} \frac{L}{D} \quad (2.32)$$

Izkaže se torej, da lahko s plastno upornostjo obravnavamo tudi nehomogeno plast na enak način kot homogeno ! Le ena razlika obstoji, definicija oz. analitični izračun plastne upornosti, v skladu z en(2.34). Vendar v praksi plastne upornosti nikoli ne računamo temveč jo enostavno in hitro izmerimo. Sama meritev plastne upornosti pa poteka v obeh primerih, homogene in nehomogene plasti, enako, pa tudi pri obravnavi in projektiranju uporov ni razlik !

Meritev plastne upornosti

Meritev plastne upornosti izvedemo s ti. 4-točkovno (4-point) metodo (SI 2.15). Posebna merilna glava ima štiri ekvidistančne električne sonde (špice), s pomočjo katerih pridemo po spustu merilne glave do električnega kontakta z merjeno plastjo. Takoj po stiku steče skozi zunanji dve sondi, ki sta priključeni na tokovni generator, nastavljeni električni tok I . Zato se na notranjih dveh sondah pojavi neka napetost V , ki jo izmerimo z visokoohmskim voltmetrom. Ker pri tej meritvi ne teče praktično noben tok skozi notranji sondi, kritični problemi okrog kontaktov in njihovih upornosti odpadejo (IR padec je enak 0).



SI 2.15 Meritev plastne upornosti s 4-točkovno metodo

Analiza pokaže, da je plastna upornost odvisna od izmerjenega razmerja V/I . V priložnikih so podani ustrezni izrazi za izračun plastne upornosti v odvisnosti od geometrijskih razmer, zlasti od (ob predpostavki neomejene plasti) razmerja med debelino plasti in razdaljo med sondami (d/a). Navedimo izraz za izračun plastne upornosti v dveh limitnih, v praksi pogosto srečanih primerov:

1. Primer tanke plasti: $d \ll a$

$$R_{sh} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} = 4.53 \frac{V}{I} \quad (2.33)$$

2. Primer debele plasti: $d \gg a$

$$R_{sh} = 2\pi \frac{V}{I} = 6.283 \frac{V}{I} \quad (2.34)$$

V praksi je meritev plastne upornosti dodatno poenostavljena s tem, da tokovni generator poganja tok, ki je mnogokratnik gornjih numeričnih faktorjev, npr. za tanko plast $I = 4.53\text{mA}$ in tako odčitek napetosti že daje direktno izmerjeno plastno upornost v $[\Omega]$! Meritev plastne upornosti neke plasti je tako opravljena v trenutku, zanesljivo, natančno in nedestruktivno.

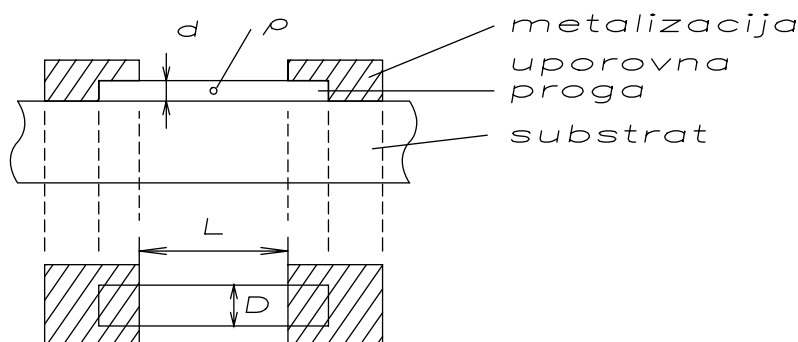
Načrtovanje uporov

Izhodiščni podatki pri načrtovanju nekega upora so: plastna upornost uporovne plasti R_{sh} , priporočena optimalna širina uporovne proge D ter seveda zahtevana upornost upora R . Določiti je torej potrebno le še dolžino uporovne proge L !

V nadaljevanju si bomo ogledali nekaj tipičnih primerov.

1. Plastni upori

Pogosto so upori izdelani s tanko uporovno plastjo, ki ima obliko traku oz. uporovne proge (linije). Praktični primeri takih uporov so tankoplastni in debeloplastni upori v hibridnih tehnologijah, difundirani upori v monolitnih tehnologijah itd. Tipično strukturo plastnega upora prikazuje SI 2.16.



SI 2.16 Struktura plastnega upora (prerez strukture in pogled z vrha oz. načrt mask)

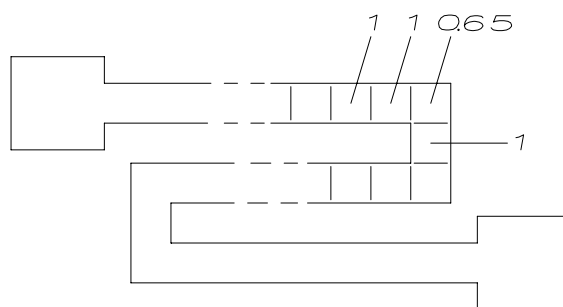
Zvezo med upornostjo, plastno upornostjo in geometrijo podaja osnovna enačba

$$R = R_{sh} \frac{L}{D} \quad (2.35)$$

od kjer brez težav izračunamo potrebno dolžino uporovne proge

$$L = D \frac{R}{R_{sh}} \quad (2.36)$$

Dodajmo še, da v primeru zavite uporovne proge (meander), ki ga srečamo v vezjih zaradi boljše izrabe površine, lahko uporovno progo obravnavamo na enak način s seštevanjem kvadratkov. Le pri kvadratih v ogliščih moramo upoštevati, da zaradi krajše poti manj prispevajo k upornosti - točnejše analize kažejo, da dajo prispevek $0.65 R_{sh}$ namesto $1 R_{sh}$ (SI 2.17).



SI 2.17 Upor zavite oblike (meander)

2. Cilindrični upori

Pogosto imajo upori cilindrično geometrijo. Praktični primeri takih uporov so običajni valjasti upori (SI 2.18a), pri katerih je tanka uporovna plast nanešena na plašču cilindričnega uporovnega telesa. Uporovna plast je običajno mnogo tanjša od polmera valja ($d \ll r$).

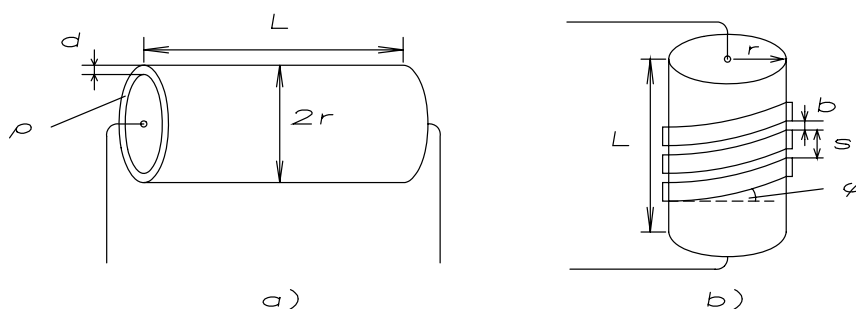
Upornost v tem primeru določimo tako, da si mislimo plašč valja po dolžini prerezan in razgrnjen, zato velja

$$R = R_{sh} \frac{L}{D} = R_{sh} \frac{L}{2\pi r} \quad (2.37)$$

Do enakega rezultata lahko za kontrolo pridemo tudi po klasični poti ($R = \rho l / A$).

3. Cilindrični rezkani upori

Pogosto v praksi povečamo upornost cilindričnega upora tako, da v uporovno progo zarezkamo spiralo in na ta način povečamo dolžino uporovne proge ter hkrati zmanjšamo njeno širino (SI 2.18b). Upornost v tem primeru dodatno določata tudi širina reza b in stopnja navoja oz. korak s .



SI 2.18 Cilindrični upor (a) in rezkani upor (b)

Upornost cilindričnega rezkanega upora najenostavneje določimo po korakih:

- širina uporovne proge: $s - b$
- upornost enega ovoja: $R_{sh} 2\pi r / (s-b)\cos\phi$
- število ovojev: L / s

Celotna upornost spiraliziranega upora pa je določena kot upornost enega ovoja, pomnoženega s številom ovojev

$$R = R_{sh} \frac{2\pi r}{s-b} \frac{l}{\cos \phi} \frac{L}{s} \quad (2.38)$$

2.2.11 UPORI PRI VIŠJIH FREKVENCAH

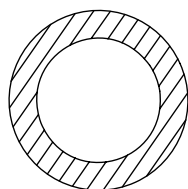
Pri nizkofrekvenčnih (nf) razmerah izkazuje upor samo svojo nazivno upornost R_n . Pri krmiljenju z visokofrekvenčnimi (vf) signali kažejo upori v splošnem spremenjene lastnosti. Za to sta odgovorna predvsem dva glavna efekta:

- 1) kožni pojav (skin effect)
- 2) vpliv parazitnih elementov (kapacitivnosti, induktivnosti)

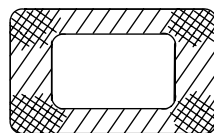
2.2.11.1 KOŽNI POJAV

Ime pojava - kožni pojav (skin effect) - nakazuje, da teče tok predvsem po koži oz. površini vodnika. Točnejše analize pokažejo, da je pri nizkih frekvencah tokovna gostota $j = dI/dA [A/cm^2]$ po vsem preseku vodnika konstantna. Pri visokih frekvencah pa se izkaže, da je gostota magnetnih silnic oz. magnetno polje v sredini vodnika večja kot ob površini, zato ima področje v sredini vodnika večjo reaktanco in teče tok predvsem v bolj prevodnem površinskem predelu vodnika.

Na Sl 2.19 je prikazana porazdelitev tokovne gostote po preseku vodnika za nekaj tipičnih geometrij. Pri vodniku okroglega preseka (Sl 2.19 a) je tokovna gostota radialno simetrična, največja v površinskem sloju in upada v globino. Pri vodniku kvadratnega preseka (Sl 2.19b) je tokovna gostota največja v ogljiščih, znatna ob stranicah in majhna v notranjosti vodnika. Pri trakastem vodniku pravokotnega preseka (Sl 2.19c) je tokovna gostota največja na robovih traku, znatna na površini traku in majhna v notranjosti.



a) okrogel vodnik



b) kvadraten vodnik



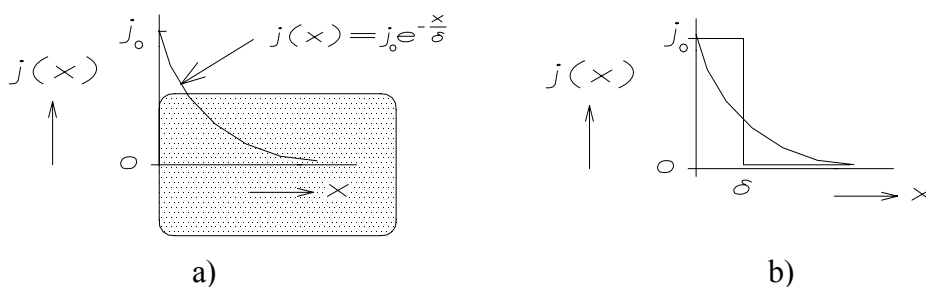
c) pravokoten(trakast)vodnik

Sl 2.19 Porazdelitev toka po preseku vodnika za različne preseke (črtkano področje označuje področja visokih tokovnih gostot)

Podrobnejša analiza pokaže, da tokovna gostota eksponencialno upada od površine v globino vodnika (Sl 2.20a), kar opisuje enačba

$$j(x) = j_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.39)$$

kjer je j_0 ... tokovna gostota na površini prevodnika ($x=0$)
 δ ... vdorna globina kožnega pojava



Sl 2.20 Upadanje tokovne gostote v globino vodnika: a) točno - eksponencialno, b) poenostavljeno - stopničasto

Poenostavljena predstava kožnega pojava

Pogosta poenostavitev kožnega pojava v praksi je predpostavka, da teče po preseku vodnika konstantna tokovna gostota j_0 , v površinskem sloju debeline δ ! Za preizkus izračunajmo debelino δ ob upoštevanju, da naj bo tok oz. integral tokovne gostote po preseku vodnika (ploščina pod krivuljo) enak v obeh primerih a) in b) na Sl 2.20:

$$\int_0^{\infty} j(x) dx = j_0 \int_0^{\infty} e^{-\frac{x}{\delta}} dx = -j_0 \delta e^{-\frac{x}{\delta}} \Big|_0^{\infty} = j_0 \delta ! \quad (2.40)$$

Torej, v poenostavljeni sliki kožnega pojava lahko pravilno predpostavimo, da teče tok konstantne tokovne gostote le v površinskem sloju debeline δ !

Analiza pokaže, da lahko vdorno globino skin efekta δ ocenimo s pomočjo enačbe/Poberaj/

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (2.41)$$

kjer je ρ ... specifična upornost materiala
 f ... frekvenca, pri kateri opazujemo kožni efekt
 μ ... magnetna permeabilnost materiala

Izraz za vdorno globino δ lahko poenostavimo za konkretni primer, če npr. vstavimo podatke (ρ , μ) za dani prevodni material. Tako npr. za bakren vodnik pri sobni temperaturi dobimo naslednji izraz

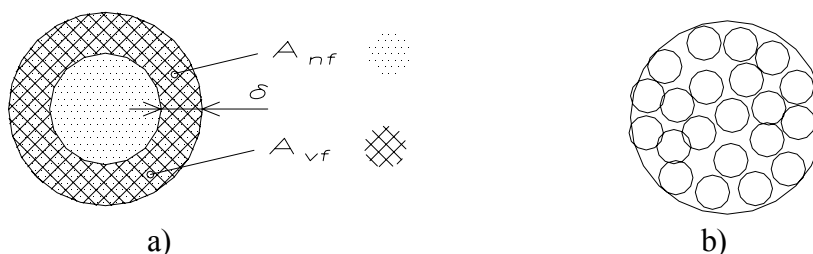
$$\delta[\text{cm}] = \frac{6.7}{\sqrt{f[\text{Hz}]}} \quad [\text{ba ker, } T = 20^\circ\text{C}] \quad (2.42)$$

Po pričakovanju vdorna globina kožnega efekta upada s frekvenco. Tabela 4 prinaša izračunano vdorno globino kožnega efekta za bakren vodnik pri ν_f (1Hz) in ν_{vf} (1MHz) razmerah.

Tabela 4 Vdorna globina kožnega efekta δ (baker, $T=20^\circ\text{C}$)

f	δ
1 Hz	6.7 cm
1 MHz	67 μm

Pri visokih frekvencah ostane torej za prevajanje toka na razpolago le majhen del od celotnega geometrijskega preseka vodnika, kot prikazuje SI 2.21a: $A_{\nu_f} \ll A_{\nu_{vf}}$.



SI 2.21 Poenostavljena predstava kožnega pojava(a) in pletenica(b)

Efektivni presek vodnika, ki ostane na razpolago za prevajanje pri ν_{vf} , lahko enostavno ocenimo iz obsega vodnika ob in vdorne globine kožnega pojava δ

$$A_{\nu_{vf}} = ob \cdot \delta \ll A_{\nu_f} = A_{geom} \quad (2.43)$$

Dodatna metoda za natančnejšo kvantitativno obravnavo kožnega pojava bo podana v Pogl. 5 pri obravnavi efektivne upornosti tuljave.

Zmanjšanje vpliva kožnega pojava

Zaradi kožnega pojava v splošnem pri ν_{vf} razmerah upornost nekega vodnika ali upora narašča. Pojav je močnejši pri debelih vodnikih, ker relativno več preseka odpade pri dani vdorni globini δ . To je razlog, da uporabljamo pri vodnikih in uporih za višje frekvence namesto ene same debele žice raje iz več tankih vlaken sestavljene žice oz. pletenice (litz-wire, "licne"), pri katerih je zaradi majhnega premera posameznega vlakna zmanjšanje efektivnega preseka zanemarljivo (SI 2.21b).

Pogoj za odpravo naraščanja upornosti pri ν_{vf} zaradi kožnega pojava je tedaj $D_1 \ll \delta$, kjer je D_1 premer posameznega vlakna, δ pa vdorna globina kožnega pojava. Pri pletenem vodniku v tem primeru pri ν_{vf} ne bo opaznega povišanja upornosti, pri pletenem uporu pa ne bo naraščanja upornosti z naraščajočo frekvenco.

2.2.11.2 VPLIV PARAZITNIH ELEMENTOV

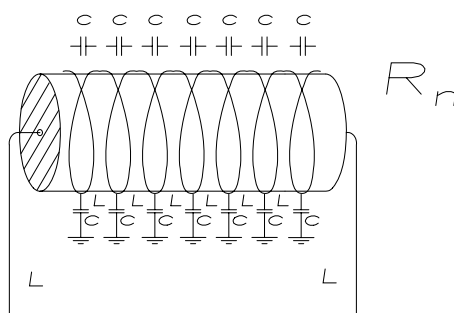
Vsaka resnična električna struktura vsebuje vedno vse tri osnovne električne komponente - upornost R , kapacitivnost C in induktivnost L . Zato vsak električni element poleg svoje osnovne koristne lastnosti (R , C ali L) vsebuje tudi ostali dve parazitni komponenti. Vpliv teh majhnih parazitnih elementov je običajno pri nizkih frekvencah (nf) zanemarljiv, pri visokih frekvencah (vf) pa imajo lahko velik vpliv na lastnosti elementov.

Kot vsaka resnična električna struktura vsebuje tudi upor poleg svoje osnovne koristne lastnosti – nazivne ohmske upornosti R_n - še razne, običajno majhne, parazitne kapacitivnosti C in induktivnosti L (SI 2.22).

Kot nazoren primer si oglejmo žični upor (SI 2.22). V splošnem imata dve prevodni ploskvi, ločeni z izolatorjem, značaj kondenzatorja in s tem neko kapacitivnost. Zato nastopajo kot majhni parazitni kondenzatorji v tej uporovni strukturi metalni ovoji, med katerimi se nahaja izolator oz. dielektrik in med katerimi vlada v obremenjenem uporu neka napetost.

Parazitnih induktivnosti v uporovni strukturi na SI 2.22 si ni težko predstavljati, saj imamo v tem primeru opraviti kar z tuljavnim navitjem. Pripomnimo pa, da imajo v splošnem celo ravni vodniki kot limitni primer tuljave neko majhno induktivnost in so torej tudi induktivnosti v vsaki resnični strukturi vedno prisotne.

Ti majhni parazitni kapacitivnostni in induktivnostni elementi so zvezno porazdeljeni po strukturi elementa.

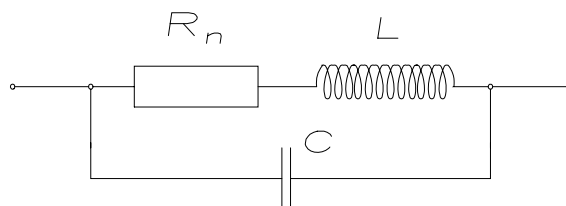


SI 2.22 Parazitni elementi navitega žičnega upora

Koncentracija parazitnih elementov

Točna obravnava resničnega električnega elementa s porazdeljenimi parazitnimi elementi je prezahtevna in prezamudna za običajno uporabo. V praksi zato običajno te porazdeljene parazitne elemente nadomestimo s koncentriranimi elementi - v našem primeru upora torej z eno samo efektivno parazitno kapacitivnostjo C in eno efektivno parazitno induktivnostjo L . Tudi proizvajalci merijo in podajajo lastnosti svojih elementov na osnovi nadomestnih vezij s koncentriranimi elementi.

Tipično nadomestno vezje resničnega upora s koncentriranimi parazitnimi elementi, ki je torej dobro tudi za opis elementa pri vf, prinaša SI 2.23. Ker je značaj parazitnih induktivnosti pri vf podoben kot značaj upornosti (duši tok), jih običajno dodamo v serijo k uporu, medtem ko parazitne kapacitivnosti pri vf prepuščajo vedno več toka (premoščajo element) in jih zato dodamo paralelno.



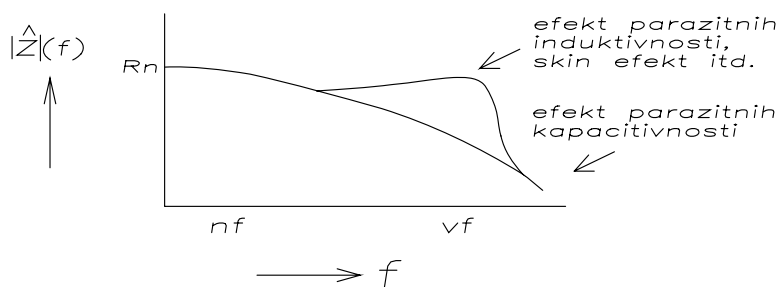
SI 2.23 Nadomestno vezje resničnega upora za visoke frekvence

Impedanca resničnega upora

Impedanca resničnega upora, v skladu z vf nadomestnim vezjem na SI 2.23, je podana z izrazom

$$\hat{Z} = \frac{I}{\frac{I}{R_n + j\omega L} + j\omega C} \quad (2.44)$$

Za karakterizacijo vf lastnosti nekega upora proizvajalci pogosto merijo in podajajo absolutno vrednost impedance v odvisnosti od frekvence. Analiza frekvenčnega poteka impedance resničnega upora kaže, da se pri nizkih frekvencah ($\omega \rightarrow 0$) resnični upor obnaša podobno kot idealni upor z upornostjo R_n . Pri višjih frekvencah lahko začnejo vplivati tudi parazitne kapacitivnosti in induktivnosti. V splošnem impedanca upora pri vf upada zaradi premoščanja ("shuntiranja") upornosti s parazitnimi kapacitivnostmi, preko katerih teče pri naraščajoči frekvenci vedno večji tok. V nekem frekvenčnem področju lahko impedanca tudi narašča zaradi parazitnih induktivnosti (SI 2.24). Frekvenčni potek impedance resničnega upora je v praksi od primera do primera drugačen, še zlasti zaradi dodatnih frekvenčnih odvisnosti, ki jih srečamo v resničnem uporu kot npr. kožni pojav, odvisnost dielektričnosti in permeabilnosti ter s tem C, L od frekvence itd.



SI 2.24 Potek impedance upora s frekvenco

Upori za vf delovanje

Podrobne vf lastnosti uporov, ki jih srečamo v praksi, so torej določene s strukturo upora. Vseeno lahko navedemo nekaj splošnih napotkov za dobro vf delovanje.

Plastni in volumnski upori kažejo pri vf razmerah v splošnem upadanje upornosti zaradi premoščanja upora s parazitnimi kapacitivnostmi. Naviti žični upori in spiralizirani plastni upori so še dodatno neugodni pri vf zaradi relativno visokih parazitnih induktivnosti.

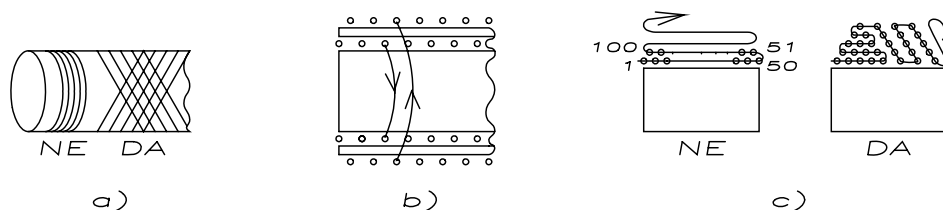
V splošnem se zato izkaže, da so najprimernejši za delo na visokih frekvencah miniaturni nespiralizirani tankoplastni upori. Ta vrsta uporov zaradi tankih uporabnih plasti ne trpi zaradi kožnega pojava, nima velikih parazitnih induktivnosti zaradi odsotnosti ovojev in nima velikih parazitnih C in L elementov zaradi miniaturnosti(majhnih površin).

Izboljševanje vf lastnosti različnih vrst uporov dosežemo lahko tudi pri izdelavi uporov z različnimi ukrepi, ki imajo za posledico znižanje parazitnih kapacitivnosti in induktivnosti.

Zmanjševanje parazitnih kapacitivnosti

V skladu z osnovno enačbo za kapacitivnost ($C = \epsilon A/d$) skušamo povečati efektivno razdaljo med ovoji (d). To lahko dosežemo s tem, da ovoji ne tečejo paralelno drug ob drugem ampak se sekajo pod kotom (SI 2.25a), ali pa z vmesno izolacijsko plastjo med sloji navitja (SI 2.25b).

Nižjo kapacitivnost ima struktura tudi, če je navita tako, da se ovoji ne srečajo po velikem številu ovojev (SI 2.25c). V nasprotnem primeru je namreč med takimi ovoji velika potencialna razlika na majhni razdalji (debelina izolacijskega laka), kar ima za posledico velike parazitne kapacitivnosti.

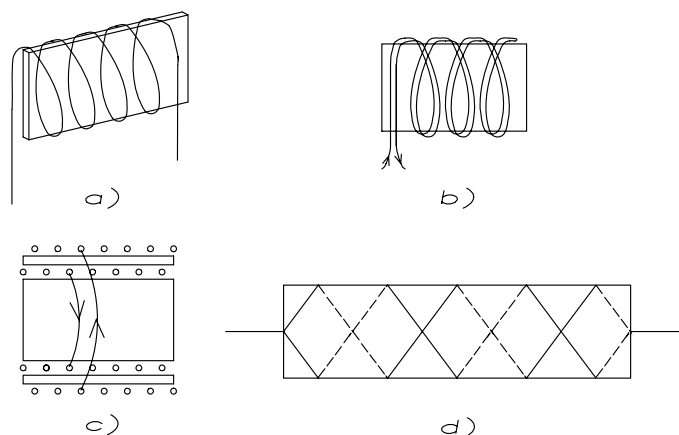


SI 2.25 Zmanjševanje parazitnih kapacitivnosti upora

Zmanjševanje parazitnih induktivnosti

V skladu z osnovno enačbo za induktivnost ($L = \mu N^2 A/l$) lahko zmanjšamo parazitno induktivnost z zmanjšanjem preseka navitja A. Zato srečamo v praksi vf upore, navite npr. na sljudno ploščico (SI 2.26a).

Parazitno induktivnost lahko zmanjšamo tudi s kompenzacijo magnetnega pretoka z raznimi antiinduktivnimi navijanjem. Pri tem srečamo več načinov, npr. bifilarno naviti upori (SI 2.26b) ali izmenično naviti sloji (SI 2.26c). Posebno dobre rezultate daje ti. Ayrton-Perry navijanje (SI 2.26d), pri katerem imamo tako nizko parazitno kapacitivnost (ovoji se sekajo pod pravim kotom) kot tudi nizko parazitno induktivnost (magnetni pretok je kompenziran, saj ima vsak ovoj paralelno še ovoj s tokom v nasprotni smeri!).

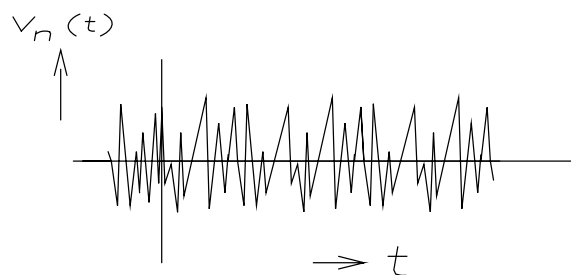


SI 2.26 Zmanjševanje parazitnih induktivnosti upora

2.2.12 ŠUM

V elektroniki si pod besedo šum (noise; rauschen) običajno predstavljamo različne vrste običajno majhnih fluktuirajočih napetosti ali tokov, ki se proti naši volji generirajo v neki elektronski komponenti ali sistemu (SI 2.27). Običajno šumne veličine zato indeksiramo s črko n (noise), npr. šumna napetost v_n .

Šum ima v elektroniki velik pomen, ker predstavlja osnovno omejitev za delovanje elementov in vezij pri majhnih signalih. Vedno morajo biti namreč delovni signali večji od prisotnega šuma, sicer so izgubljeni v šumu oz. jih ne moremo izločiti iz šuma in uporabiti.

SI 2.27 Tipičen časovni potek šumne napetosti $u_n(t)$

Pregled izvorov šuma

Šume razdelimo običajno v dve kategoriji:

1. Komponente šuma, ki jih lahko, vsaj principiarno, z ustrezno zasnovo vezja eliminiramo :

- Šum omrežja (50Hz) se vtihotapi v nas sistem z različnimi efekti kot npr. z omrežno napetostjo ogrevane termionske katode elektronk, z indukcijo preko raznih tuljav in transformatorjev na 50Hz z ostalimi induktivnostmi v sistemu itd. S primernimi prijemi (filtriranje, EM zaščita...) lahko ta periodični šum učinkovito zmanjšamo.
- Šum oz. motnje iskrenja pri raznih motorjih (npr. iskrenje pri vžigu bencinskega

motorja, iskrenje na krtačkah pri elektromotorjih) so tudi periodični šumi, ki jih najučinkoviteje eliminiramo z blokiranjem pri izvoru.

- Mikrofonski efekt nastopi zaradi mehanskih vibracij našega sistema ali komponente; npr. zaradi sprememb v medelektrodnih razdaljah neke komponente se pojavi ustrezna popačitev toka.

- Izvori intenzivnega EM valovanja (npr. radio in TV oddajniki, röntgenski aparati) generirajo šum v bližnjih napravah, motnje se prenašajo po zraku ali omrežju.

2. Komponente šuma, ki so posledica fundamentalnih naravnih procesov in jih principiелno ne moremo eliminirati, s primerno zasnovjo jih lahko le zmanjšamo :

- Termični šum (Thermal noise, Johnson noise) se pojavi, ko se zaradi naključnostne (random) narave termičnega gibanja elektronov v snovi na konceh neke komponente naključnostno pojavljajo presežki ali primankljaji naboja, kar ima za posledico nastanek neke majhne fluktuirajoče napetosti preko komponente.

- Zrnati šum (shot noise) se pojavi, kadar morajo elektroni v komponenti premagati neko potencialno bariero z lastno kinetično energijo; ker je le-ta porazdeljena med elektrone naključno, velja to tudi za prehode elektronov in rezultirajoči električni tok fluktuira. Zrnati šum srečamo v elementih, ki krmilijo tok z višino potencialne bariere (elektronke, bipolarni transistorji itd.).

- Porazdelitveni šum (Partition noise) nastopi, kadar sta v elementu dve ali več zbirnih (kolektorskih) elektrod. Usmeritev posameznega elektrona na neko elektrodo je naključna, zato je naključna, fluktuirajoča tudi delitev toka, kar predstavlja dodaten izvor šuma. Ta šum bo tem večji, čim več zbirnih elektrod vsebuje element. Srečamo ga torej v multikolektorskih elementih (npr. pentode, multikolektorski transistorji itd.).

- Barkhausenov šum nastopa v feromagnetnih materialih, kadar se pri magnetenju takega materiala naključno, preskakajoče, vrtijo magnetne domene.

- Tokovni šum (Current noise), imenovan tudi kontaktni šum, nastopi zaradi naključnostnega spreminjanja kontaktnih upornosti med zmi materiala, kar povzroči fluktuacije toka pri konstantni pritisnjeni napetosti na takem elementu. Srečamo ga v prevodnih in uporovnih materialih z zrnato strukturo (npr. ogljeni upori).

- Šum zapisa (Grain noise) se pojavi pri zapisu ali prenosu signalov zaradi končne velikosti osnovnih zapisnih elementov; npr. osnovni element (piksel) pri TV sliki, zrna v rezu zaradi strukture gramofonske plošče itd. Posledica je zabrisanost zapisanega signala.

- Še drugi efekti, ki jih srečamo v elektronskih komponentah in so statistične narave (npr. sekundarna emisija elektronov iz metala, fotogeneracija elektronov, plazovita ionizacija itd.).

Karakterizacija šuma

Natančna meritev pokaže, da je šum sestavljen iz majhnih, neperiodičnih, naključnih fluktuacij napetosti $v_n(t)$ (Sl 2.27), ki gredo na časovni skali od - do + neskončno. Za karakterizacijo takega signala bi rabili neskončno podatkov in torej ta možnost odpade.

Časovno povprečje fluktuacij šumne napetosti mora biti zaradi naključnostne narave tega pojava enako nič

$$\overline{v_n} = 0 \quad (2.45)$$

in torej šuma ne moremo karakterizirati niti s podajanjem njegove povprečne vrednosti.

Zato izberemo naslednjo možnost, to je efektivna oz. rms vrednost napetosti (root mean square, koren povprečja kvadrata), kot prikazuje en(2.46). Pri tej operaciji najprej s kvadriranjem vse vrednosti naredimo pozitivne, s povprečenjem tega dobimo merilo velikosti pojava in končno povprečno vrednost še korenimo, da dobimo osnovno dimenzijo nazaj, v našem primeru [V]

$$v_{rms} = \sqrt{v_n^2(t)} \quad (2.46)$$

2.2.12.1 Šum pri ohmskih uporih

Pri ohmskih uporih je potrebno običajno upoštevati predvsem dve vrsti šuma: termični šum in tokovni šum.

Termični šum

Termični (Johnsonov) šum nastane zaradi naključne narave termičnega gibanja elektronov v snovi. Pri tem pride do naključnega pojavljanja presežkov in primanjkljajev elektronov na koncih elementa. Po Poissonovi enačbi ($dE/dx = \rho/\epsilon$) naboji rodijo električno polje, to pa napetost ($V = -SEdx$). Fluktuirajoči elektroni tako povzročijo majhne, fluktuirajoče napetosti preko komponente - šum. Termične fluktuacije elektronov in s tem termični šum naraščajo s temperaturo.

Opis termičnega šuma podaja Nyquistova enačba

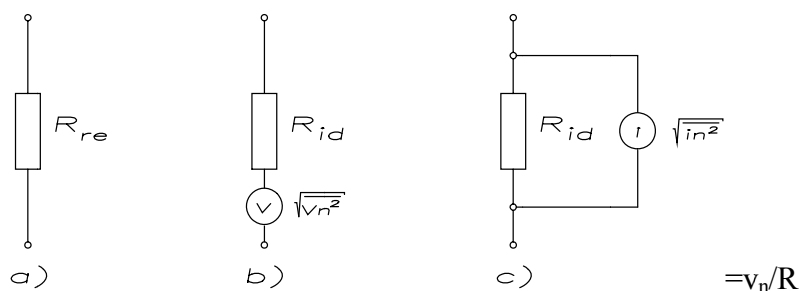
$$\sqrt{v_n^2} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2.47)$$

kjer je k ... Boltzmannova konstanta
 T ... absolutna temperatura [K]
 R ... upornost danega upora
 Δf ... frekvenčni pas signalov na uporu

Nyquistovo enačbo lahko za razmere pri sobni temperaturi zapišemo v poenostavljeni obliki ob upoštevanju $T=300^\circ\text{C}$, $4kT=10^{-20}\text{Ws}$

$$\sqrt{v_n^2} [\mu\text{V}] = 10^{-4} \sqrt{R[\Omega] \Delta f[\text{Hz}]} \quad (2.48)$$

Nadomestno vezje resničnega upora s šumom (Sl 2.28a) je običajno sestavljeno iz idealnega upora brez šuma z zaporednim napetostnim šumnim generatorjem (Sl 2.28b) ali ekvivalentno po Nortonovem teoremu s paralelnim tokovnim generatorjem (Sl 2.28c).



SI 2.28 Nadomestno vezje upora s šumom

Mejna frekvenca termičnega šuma je zelo visoka, saj je določena z naravno frekvenco elektronov (10^{13} Hz), zato je ta šum v praksi neodvisen od frekvence in ga včasih po analogiji z lastnostmi bele svetlobe iz optike imenujejo tudi beli šum (white noise).

Primer: Oцени termični šum upora $R = 1\text{k}\Omega$ v frekvenčnem pasu 100kHz pri sobni temperaturi!

Rešitev: podatke vstavimo v poenostavljeno Nyquistovo en(2.48) in dobimo

$$\sqrt{v_n^2} = 10^{-4} \sqrt{10^{+3} \cdot 10^{+5}} \mu\text{V} = \underline{1\mu\text{V}} \quad (2.49)$$

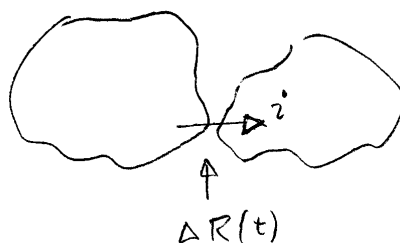
Komentar: Če je na vhodu nekega ojačevalnika vhodna upornost npr. $1\text{k}\Omega$, bodo torej zaradi termičnega šuma v tem primeru izgubljeni vsi vhodni signali pod $1\mu\text{V}$ oz. tak ojačevalnik ne more delati s signali, nižjimi od te vrednosti!

Zmanjšanje termičnega šuma

V skladu z Nyquistovo en(2.49) termični šum lahko znižamo z zmanjšanjem upornosti R ali frekvenčnega pasu Δf , kar pomeni spremenjeni načrt elektronskega vezja, ali pa uporabimo hlajenje vezij in naprav na nizke temperature (T).

Tokovni šum

Tokovni šum (current noise) nosi včasih tudi ime utripajoči (flicker) šum. Tokovni šum upada preko širokega področja frekvenc kot $1/f$ in se zato včasih imenuje tudi $1/f$ šum.



SI 2.29 Fluktuacija kontaktnih upornosti med zrnih materiala

Tokovni šum nastane zaradi naključnih, časovnih fluktuacij kontaktnih upornosti $\Delta R(t)$ med zrni materiala, kot npr. grafitna zrna pri ogljenih uporih, polikristali kovine pri metalnih uporih (SI 2.29). Tudi v tem primeru te fluktuacije upornosti karakteriziramo z njihovimi efektivnimi (rms) vrednostmi $\sqrt{\Delta R_n^2}$. Pri konstantnem toku skozi upor imajo omenjene fluktuacije kontaktnih upornosti po Ohmovem zakonu za posledico fluktuacijo napetosti na uporu, kar zato imenujemo tokovni šum. Tokovni šum običajno karakteriziramo s pomočjo efektivne vrednosti teh fluktuacij.

$$\sqrt{v_n^2} = \sqrt{\Delta R_n^2} I \quad (2.50)$$

Če delimo gornjo enačbo z zvezo po Ohmovem zakonu ($V = I R$), dobimo zapis v relativni oz. brezdimenzijski obliki

$$\frac{\sqrt{v_n^2}}{V} = \frac{\sqrt{\Delta R_n^2}}{R} \quad (2.51)$$

Relativne fluktuacije upornosti ali napetosti na uporu so torej pri tokovnem šumu enake, ne glede na tok upora. Proizvajalci zato podajajo tokovni šum običajno z relativnimi fluktuacijami napetosti $[\mu V/V]$ ali ekvivalentno (številčno isto) z relativnimi fluktuacijami upornosti $[\mu \Omega/\Omega]$.

Tokovni šum je močno odvisen od strukture in tehnologije upora ter ga lahko s primernimi prijemi močno zmanjšamo. Pri dobri tehnologiji znaša ta šum za ogljene upore tipično nekaj $\mu\Omega/\Omega$ oz. $\mu V/V$, za frekvenčno področje ene deкаде. Pri metalnih uporih je tokovni šum običajno za red velikosti manjši. Za širše frekvenčno področje od ene deкаде seštejemo prispevke po dekadah - enostavno pomnožimo gornji podatek s številom dekad.

2.2.12.2 Šum pri drugih elektronskih elementih

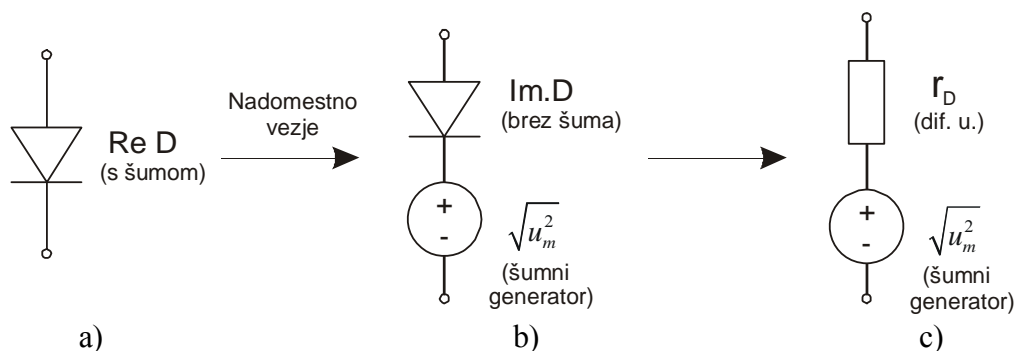
Pri obravnavi šuma neke elektronske naprave se običajno izkaže, da od vseh elektronskih komponent k šumu največ prispevajo upori in aktivni elementi.

Kondenzatorji in tuljave: Pri idealnih kondenzatorjih in tuljavah šuma principiarno ni. Pri resničnih kondenzatorjih in tuljavah se šum zaradi ohmskih komponent strukture ter neidealnega obnašanja dielektrika v kondenzatorju ali jedra v tuljavi sicer javlja, vendar je šum teh elementov običajno mnogo manjši od ostalih šumnih prispevkov v vezju. Zato običajno v vezjih za določitev celotnega šuma zadostuje analiza šumnih prispevkov uporov in aktivnih elementov.

Izvori (generatorji): Podobno je tudi šumni prispevek izvorov (generatorjev) običajno zanemarljiv.

Aktivni elementi: Aktivni elementi imajo običajno velik prispevek k celotnemu šumu vezja. Zlasti se v teh elementih javlja $1/f$ (tudi flicker, excess) šum, ki je zaradi karakteristične frekvenčne odvisnosti ($1/f$) velik pri nizkih frekvencah. Podobno kot smo videli pri uporih, tudi pri aktivnih elementih obravnavo šuma vezja običajno izvedemo s pomočjo šumnih nadomestnih vezij, ki jih dobimo, če resnični element s šumom nadomestimo z idealnim elementom brez šuma in šumnim generatorjem. Ker so šumni signali majhni signali, pri tem lahko uporabimo linearna nadomestna vezja aktivnih elementov za majhne signale. To močno poenostavi šumno analizo vezij, saj imamo opravka z linearnimi vezji in enačbami ter lahko uporabljamo zakonitosti reševanja linearnih vezij (serijska in paralelna redukcija, superpozicija itd.).

Na Sl 2.30 je kot primer prikazano šumno nadomestno vezje polprevodniške diode. Resnično diodo s šumom (Sl 2.30a) nadomestimo z idealno diodo brez šuma in ustreznim šumnim generatorjem $\sqrt{v_n^2}$, kot prikazuje Sl 2.30b. Ker so šumi vedno majhni signali v razredu nekaj μV , lahko pri obravnavi šuma diodo nadomestimo z nadomestnim vezjem za majhne signale, torej z njeno diferencialno upornostjo r_D in tako dobimo končno šumno nadomestno vezje diode (Sl 2.30c). Šumni napetostni generator diode z efektivno vrednostjo $\sqrt{v_n^2}$ običajno dobimo v katalogu proizvajalca ali ga določimo z meritvijo. Včasih je namesto napetostnega šumnega generatorja podan tokovni šumni generator $\sqrt{i_n^2}$. V tem primeru je šumno nadomestno vezje diode paralelna vezava diferencialne upornosti in tokovnega šumnega generatorja.



Sl 2.30 Šumno nadomestno vezje polprevodniške diode

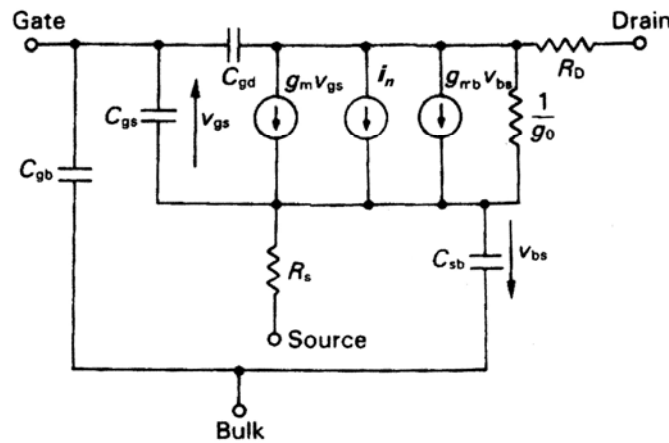
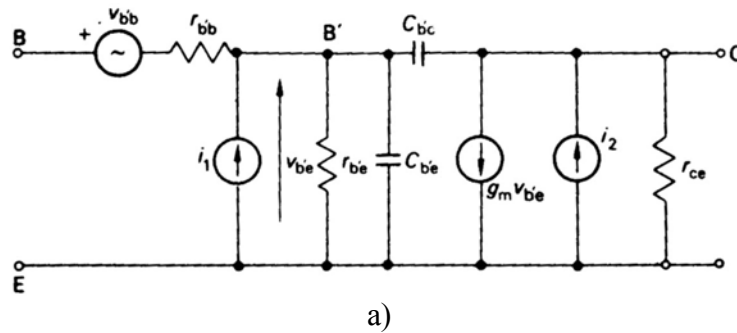
Podobno postopamo pri drugih aktivnih elementih. Pri transistorjih torej šumna nadomestna vezja dobimo s tem, da običajnim nadomestnim vezjem transistorjev za majhne signale (brez šuma) dodamo ustrezne šumne generatorje.

Pri bipolarnem transistorju običajno zadostuje (BarLev294), če v bazno-emitorsko vejo dodamo šumni generator $i_1 = 2qI_B\Delta f$, v kolektorsko-emitorsko vejo pa šumni generator $i_2 = 2qI_C\Delta f$ (Sl 2.31a), kjer je Δf frekvenčni pas signalov.

Pri MOS transistorju običajno zadostuje (BarLev296), če med ponor (D) in izvor (S) dodamo šumni generator i_n , sestavljen iz prispevka termičnega in utripajočega (flicker) šuma. Pri tem zaradi nekoreliranosti obeh šumov lahko seštevamo kar kvadrate njihovih rms vrednosti

$$\overline{i_n^2} = \overline{i_{nth}^2} + \overline{i_{nfl}^2} = \frac{4kT\Delta f}{R_{ch}} + \frac{2K_f I_{DS}}{L^2} \ln \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (2.52)$$

Pri tem je $\Delta f = f_{max} - f_{min}$ frekvenčni pas signalov. R_{ch} je upornost kanala, enaka $1/g_m$ oz. $2/3g_m$ za linearno področje oz. področje nasičenja, respektivno. K_f je koeficient utripajočega šuma, tipično $3 \cdot 10^{-24}$. L je dolžina kanala.



SI 2.31 Šumno nadomestno vezje za a) bipolarni in b) MOS transistor

2.2.12.3 Določitev šuma v vezju

Za določitev celotnega šuma v izbrani točki danega vezja je potrebno upoštevati prispevke vseh šumnih izvorov v vezju !

Šumni signali so običajno neki majhni fluktuirajoči signali, npr. napetostne fluktuacije v razredu $[\mu V]$. Zato lahko za opis elementov uporabimo običajna nadomestna vezja za majhne signale, sestavljenih le iz linearnih elementov (R , C , L , tokovni in napetostni generatorji), kar vodi do linearnih vezij oz. enačb. To močno poenostavi šumno analizo vezij, saj je v tem primeru reševanje enostavno, kot v primeru navadnih linearnih vezij (serijska in paralelna redukcija, superpozicija itd.).

Postopek:

1) Elemente v obravnavanem vezju nadomestimo z ustreznimi šumnimi nadomestnimi vezji, torej z linearnimi nadomestnimi vezji za idealne elemente pri majhnih signalih in šumnimi generatorji.

To nas vodi na linearna vezja in linearne enačbe.

2) Z običajnimi metodami reševanja linearnih vezij (serijska in paralelna redukcija, superpozicija itd.) določimo trenutno šumno napetost $v_n(t)$ v neki izbrani točki vezja "x".

Pri tem zaenkrat smatramo šumne generatorje kot običajne generatorje, katerih časovna odvisnost $v_n(t)$ je v celoti poznana.

Rezultat je torej šumna napetost v izbrani točki vezja $v_{nx}(t)$, ki je zaradi linearnosti problema (princip superpozicije) linearno odvisna od vseh prisotnih šumnih generatorjev, kar zapišemo v obliki

$$v_n(t) \Big|_x = a_1 v_{n1}(t) + a_2 v_{n2}(t) + \dots \quad (2.53)$$

kjer so koeficienti a_i odvisni od danega vezja in jih določimo pri omenjeni linearni analizi vezja.

3) Na dobljenem izrazu za $v_{nx}(t)$ izvedemo operacijo rms (kvadriramo, povprečimo, korenimo). Pri povprečenju mešani členi tipa $v_{ni}(t) \cdot v_{nj}(t)$ ($i \neq j$) odpadejo, ker so različni šumni generatorji med seboj nepovezani (nekorelirani) in so ustrezni integrali enaki 0

$$\frac{1}{T} \int_0^T v_{ni}(t) v_{nj}(t) dt = 0 \quad i \neq j \quad (2.54)$$

Izjema so nemešani členi tipa $v_{ni}(t) \cdot v_{ni}(t) = v_{ni}^2(t)$ $i = 1, 2, \dots$, kar vodi do rms vrednosti teh členov. V izrazu za šumno napetost ostanejo torej le prispevki rms vrednosti posameznih šumnih generatorjev, seveda v skladu z en(2.53) uteženi vsak s svojim koeficientom a_i .

Če dobljeni izraz korenimo, dobimo iskano efektivno oz. rms vrednost šumne napetosti v izbrani točki vezja $\sqrt{v_n^2} \Big|_x$

$$\sqrt{v_n^2} \Big|_x = \sqrt{a_1^2 v_{n1}^2 + a_2^2 v_{n2}^2 + \dots} \quad (2.55)$$

V en(2.55) nastopajoče kvadrate efektivnih vrednosti posameznih šumnih generatorjev v nadomestnih vezjih elementov $\overline{v_{ni}^2}$ ($i = 1, 2, \dots$) običajno dobimo v katalogih proizvajalcev elementov ali določimo z meritvijo. S pomočjo ustreznih enačb oz. modelov (npr. Nyquistova enačba za termični šum) lahko te vrednosti tudi izračunamo.

Gornji postopek določitve šuma smo zaradi enostavnosti prikazali za primer uporovnih vezij. Če so v vezju poleg R prisotni tudi C in L elementi, se sam postopek ne spremeni, le za opis elementov moramo uporabiti impedance. V tem primeru imamo torej opraviti s kompleksnimi izrazi, ki so frekvenčno odvisni. Zato je potrebno v tem primeru za določitev celotnega šuma še sešteti šumne prispevke po infinitezimalnih frekvenčnih pasovih df oz. integrirati preko vseh frekvenc po danem frekvenčnem pasu.

2.3 ZNAČILNOSTI UPOROVNIH DRUŽIN

2.3.1 RAZDELITEV UPOROV

Upore lahko glede na njihove osnovne značilnosti in tehnologije razdelimo v več družin.

I. Ohmski upori

Za to družino uporov srečamo včasih tudi ime linearni upori, ker je $I(V)$ karakteristika takega upora premica (SI 2.32a) oz. njegova ohmska upornost R konstantna. Pri resničnem uporu pa naj bi bila njegova ohmska upornost vsaj čimbolj neodvisna od zunanjih vplivov kot so npr. temperatura, priključena napetost, vlaga, ambient itd. Ohmske upore običajno razdelimo v dve skupini: fiksni in nastavljivi upori.

1. Fiksni upori

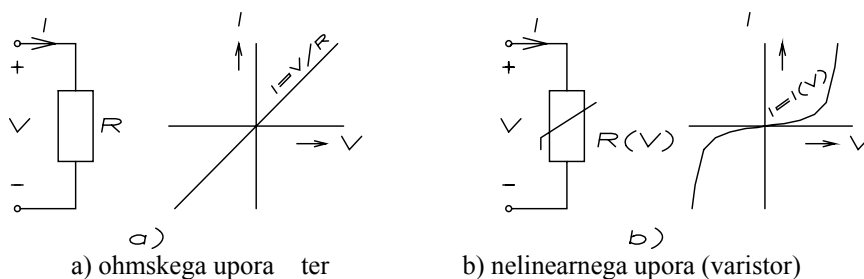
Pri fiksni uporih je upornost za uporabnika nespremenljiva, se je ne da (ročno) nastavljati. Ločimo več družin fiksni uporov, glede na izvedbo uporabnega področja:

- plastni upori
- žični upori
- specialni upori

2. Nastavljivi upori

Pri tej vrsti uporov lahko uporabnik sam v določenih mejah (ročno) nastavlja upornost elementa. Običajno ločimo dve izvedbi:

- potenciometri
- trimmerji



SI 2.32 Električni simbol in $I(V)$ karakteristika:

II. Nelinearni upori

Pri teh elementih upornost ni konstantna in je zato $I(V)$ karakteristika v splošnem neka krivulja (SI 2.32b). Upornost elementa je odvisna od nekega zunanjega parametra. Glede na značaj tega kontrolnega parametra, ki določa upornost elementa, delimo nelinearne upore v več skupin:

1. Temperaturno odvisni upori (termistorji)

Kontrolni parameter, ki določa upornost elementa, je v tem primeru temperatura. Glede na predznak temperaturnega koeficienta elementa delimo termistorje v dve družini:

- NTC termistorji (negativni temperaturni koeficient)
- PTC termistorji (pozitivni temperaturni koeficient)

2. Napetostno odvisni upori (varistorji)

Kontrolni parameter, ki določa upornost, je v tem primeru napetost na elementu.

3. Svetlobno odvisni upori (fotoupori)

Kontrolni parameter, ki določa upornost, je v tem primeru jakost osvetlitve elementa.

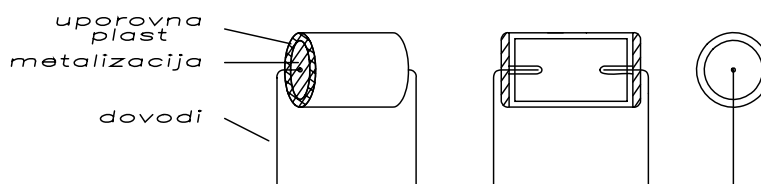
V nadaljevanju bo podan pregled osnovnih struktur, lastnosti in aplikacij nekaterih važnejših ohmskih uporovnih družin. Nelinearni upori bodo pregledani v naslednjem poglavju.

2.3.2 PLASTNI UPORI

Strukturo plastnega upora prikazuje Sl 2.33 : po celotni površini uporovnega telesca (običajno keramičen valjček) je nanešena uporovna plast, na čelne ploskve pa še metalizacijska plast. Plastne upore delimo glede na material uporovne plasti v dve družini:

- **ogljenooplastni upori :** uporovna plast je v tem primeru sestavljena iz zrn ogljika (C), zato srečamo v priročnikih za to vrsto uporov tudi okrajšano ime CF (Carbon Film) upori.

- **metalplastni upori :** uporovno plast v tem primeru sestavlja tanka plast (film) primerne kovine, npr. niklja s primesmi fosforja Ni(P) ali legura niklja in kroma NiCr . Zato srečamo v priročnikih za to vrsto uporov tudi okrajšano ime MF (Metal Film) upori.



Sl 2.33 Struktura cilindričnega plastnega upora

Tehnologija plastnih uporov

Pregled tehnologije omogoči razumevanje nekaterih osnovnih lastnosti, prednosti, omejitev in aplikacij elementov. Tehnologijo plastnih uporov razdelimo na naslednje osnovne korake:

1. **Izhodiščni material** so cilindrična telesa iz kvalitetne, visoko čiste (high-purity grade) keramike (Sl 2.30). Uporovna telesa so na čelnih ploskvah poglabljena z utori, za kasnejše dovodne žice zaradi zanesljivejšega mehanskega kontakta in boljšega termičnega kontakta, saj se znaten del sproščane toplote na obremenjenem uporu odvaja preko dovodov.

2. **Začetna obdelava** keramičnih valjčkov poteka v več stopnjah.

- **brušenje :** v bobnih, ki rotirajo, se valjčki drgnejo drug ob drugega. Dodani brusilni prašek (korund itd.) poskrbi, da se pri tem površina valjčkov obrusi, zabrišejo se razni ostri robovi in konice, ki so nastali pri izdelavi keramičnih valjčkov in bi kasneje

povzročali nestabilnosti elementa.

- poliranje : postopek je enak kot pri brušenju, le da je dodan finejši polirni prašek (drobnejša zrna). Tako dobijo valjčki primerno gladko površino, kar je nujno zlasti pri izdelavi tankih uporovnih plasti za visokoohmske upore.

- jedkanje : v 2% fluorovodikovi (HF) kislini se površina rahlo najedka, da dobimo primerno fino hrapavo površino, ki je potrebna za dobro oprijemljivost (adhezijo) metalnih in uporovnih plasti, kar je kritično zlasti pri nanašanju debelih uporovnih plasti in metalizaciji.

3. **Čiščenje pred nanašanjem uporovne plasti** je zelo važen postopek za kvaliteto izdelanih elementov in poteka običajno v dveh fazah:

- spiranje : v tekoči deionizirani (DI) vodi (specifična upornost $100\text{k}\Omega \div 1\text{M}\Omega$) ob dodatni stimulaciji z ultrazvokom (UZ), ki poskrbi, da zaradi vibracij izstopajo razni delci nečistoč tudi iz por globoko v materialu.

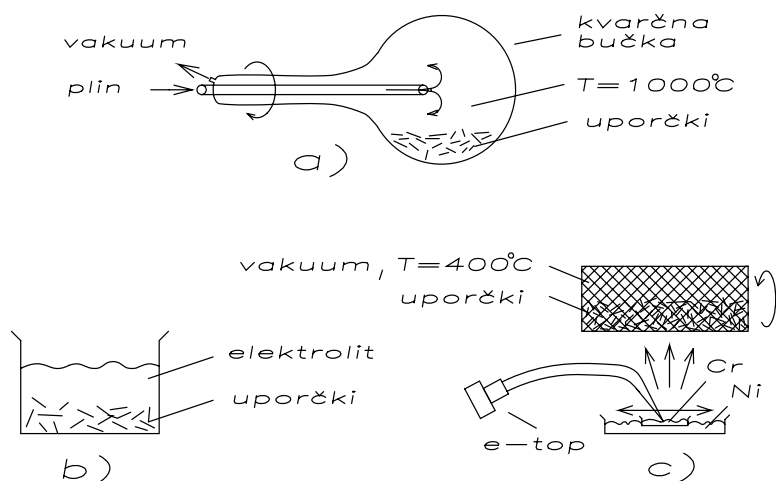
- sušenje : v centrifugi najprej mehansko odstranimo večji del vode, nato pa s sušenjem v tunnelski peči (tekoči trak skozi določen visokotemperaturni profil in včasih kontroliran, npr. inerten ambient) dosežemo popolno osušitev .

4. **Nanašanje uporovne plasti** poteka na različne načine, odvisno od materiala uporovne plasti oz. uporovne družine (C pri CF , Ni(P) ali NiCr pri MF) :

a) Nanašanje ogljenih plasti (sl.34a) poteka s postopkom pirolize tj. termičnim razpadom ogljikovodikov (heptan za višje upornosti, bencen za nižje upornosti) na visokih temperaturah okrog 1000°C , v vakuumu ($0.1 \div 0.5$ Torr). Debelina filma (tipično $0.5 \div 5 \mu\text{m}$) je določena s količino uporov v bobnu, časom depozicije in pretokom plinov.

b) Nanašanje Ni(P) plasti, ki služi za realizacijo nižjih upornosti MF uporov, poteka z breztokovno elektrokemijsko depozicijo (Sl 2.34b). Pri tem postopku se iz močno prenasičenega elektrolita, na predhodno s paladijem (Pd) aktivirano površino keramike, zaradi visoke koncentracije ionov v elektrolitu izločajo sami od sebe, brez zunanje pritiskane napetosti oz. toka (od tod ime!) atomi metala npr. Ni z dodatkom fosforjevih atomov P, oz. krajše Ni(P) . Tako raste tanka plast na površini keramičnega telesca. Debelina filma je določena s sestavo elektrolita in časom depozicije.

c) Nanašanje NiCr plasti , ki služi za realizacijo višjih upornosti, je izvedeno z napajanjem v vakuumu 10^{-6} Torr z elektronskim topom na aktivirano površino rotirajočih keramičnih valjčkov (Sl 2.34c). Debelina filma je določena z močjo na elektronskem topu in časom depozicije.



SI 2.34 Nanašanje uporovnih plasti pri ogljenoplastnih(a) in metalplastnih Ni(P) (b) ter NiCr (c) uporih

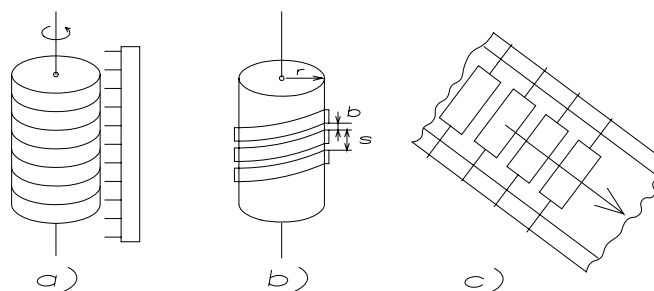
5. **Predlakiranje** (SI 2.35a) služi za zaščito uporovne plasti med kasnejšimi postopki, zlasti pri naslednjem postopku metalizacije čelnih ploskev. Ščetka, napojena z lakom, drsi po plašču upora, ki se vrti v posebni napravi okrog svoje osi, pri temperaturi 300°C , da se lak na hitro delno (površinsko) zasuši. Končno (globinsko) sušenje poteka v tunelski peči na 280°C , vendar traja dalj časa.

6. **Metalizacija** čelnih ploskev je izvedena z breztokovno elektrokemijsko depozicijo bakra in niklja (Cu/Ni). Najprej je izvedeno nanašanje bakra iz raztopine Cu sulfata v vodi, sledi spiranje in depozicija niklja iz raztopine Ni sulfata v vodi v istem bobnu, na temperaturi $T = 40 \div 50^{\circ}\text{C}$.

Pri nekaterih izvedbah uporov pa je metalizacija na upor pritrjena mehansko, z mehansko vtisnjeno kovinsko kapico ali navito žico.

7. **Spiranje** elektrolita in sušenje poteka podobno kot pred nanašanjem uporovne plasti, le da je tu prisoten še predhodni varčevalni korak - najprej je na vrsti spiranje v navadni vodi.

8. **Spiralizacija** služi za realizacijo višjih upornosti pa tudi za doravnavanje (trimanje) natančnih vrednosti upornosti (SI 2.35b). Vrezovanje vijačnice (spirale) v uporovno plast (spiralizacija) poteka na posebnih rotirajočih napravah, ki rotirajo upore okrog lastne osi, primakne se računalniško vodeno rezalno orodje in reže v uporovno plast ustrezno spiralo, upornost raste. Trenutna vrednost upornosti se med vrezovanjem spirale meri in v trenutku, ko je dosežena predpisana vrednost, računalnik da ukaz za odmik rezalnega orodja. Rezalno orodje je lahko diamantna žaga ali laserski žarek. Korak reza je finejši pri laserju in s tem tudi faktor največjega možnega povečanja upornosti. Tipično lahko dosežemo z diamantno žago povečanje osnovne (tj. približno plastne) upornosti do 1000X, medtem ko z laserjem do 3000X. Izračun upornosti spiraliziranega upora je bil prikazan v pogl. Plastna upornost.



SI 2.35 Predlakiranje (a), spiralizacija (b) in trakiranje (c) pri plastnih uporih

9. Zaključni koraki procesa :

- vstavljanje dovodnih žičk
- prvo trakiranje (vpenjanje uporov med para začasnih lepilnih trakov, SI 2.35c)
- trak z elementi gre skozi kopel v fluksu (čiščenje površine in izboljšava spajkljivosti)
- trak z elementi gre skozi kopel v spajki (Pb/Ag/Sn), čelne metalizirane ploskve se odebelijo
- ultrazvočno čiščenje ostankov fluksa; važno, ker bi sicer ostanki fluksa kasneje med dolgoletnim delovanjem na vlagi in temperaturi razpadali, tako nastale kisline bi korodirale element in mu skrajšale življenjsko dobo
- prvo testiranje z električno obremenitvijo (P_n, T, t) in izločanje slabih elementov
- končno lakiranje (električna, mehanska in klima zaščita)
- označevanje upornosti (barvni kolobarji itd.)
- končno staranje (P_n, T, t)
- 100% testiranje in končno izločanje slabih elementov
- končno trakiranje preostalih dobrih elementov

Komentar k tehnološkemu procesu :

- Maksimalna plastna upornost ogljenih plasti znaša okrog $10k\Omega$, pri NiCr plasteh pa okrog $1.3k\Omega$! Ker je pri standardnih geometrijah cilindričnih uporov (SI 2.6) obseg istega reda velikosti kot dolžina, predstavlja plastna upornost obenem tudi maksimalne upornosti, ki jih lahko realiziramo brez spiralizacije oz. maksimalne vrednosti upornosti za vf upore.
- Za višje vrednosti upornosti se spiralizirajo vse vrste obravnavanih uporovnih plasti. Najvišje upornosti daje NiCr plast, rezkana z laserjem (do $1 M\Omega$).
- Temperaturni koeficient upornosti izdelanih uporov je odvisen od različnih tehnoloških podrobnosti kot npr. od strukture keramike, podrobnosti obdelave njene površine, razmer ob nanašanju uporovne plasti (vlaga, ambient) itd. Zato običajno po končanem procesu upore testirajo in razvrščajo v razrede glede na izmerjeni temperaturni koeficient.
- Staranje je pri metalplastnih uporih izvedljivo brez težav, saj se ti elementi pri procesu staranja, ki je največkrat nekakšen proces oksidacije zaradi prisotnosti zraka in vlage na povišani temperaturi, prevlečejo s stabilnimi oksidi, ki še dodatno ščitijo upor pred nadaljnji vplivi okolice (npr. CrO_2 pri NiCr itd.). Pri ogljenih uporih pa med procesom staranja neprestano poteka oksidacija uporovne plasti: $C + O_2 \rightarrow CO_2$! V tem primeru nastajajoči plin CO_2 difundira skozi zaščitni lak ven iz upora in posledica je pravzaprav neprestano izparevanje C uporovne plasti, tako med procesom staranja kot tudi med kasnejšim delovanjem upora ! Zato ogljenih uporov ne moremo uspešno pospešeno starati npr. na povišani temperaturi. Med dolgoletnim delovanjem ogljenega upora pa se uporovna plast počasi a stalno tanjša, zato upornost takega upora s časom stalno narašča in element ni stabilen. Efekt je izrazitejši pri tanjših plasteh oz. visokoohmskih uporih (gl. npr. Staranje, Nestabilnost).

V nadaljevanju si bomo ogledali tipične lastnosti in aplikacije važnejših uporovnih družin. Na mestu je pripomba, da navedene vrednosti podatkov predstavljajo tipične, povprečne vrednosti, ki so lahko pri nekem proizvajalcu presežene, pri drugem pa sploh ne dosežene.

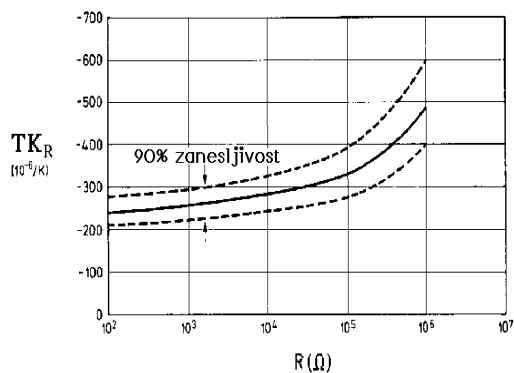
Tipične lastnosti ogljenoplastnih (CF) uporov

- Območje upornosti $/R_n/$: $1\Omega \div 1M\Omega$
- Tolerance : 5% (E24) 2% (E48) /srednje/
- Maksimalna temperatura $/T_{max}/$: 155°C /rel.nizko/
- Nazivne moči $P_n/$: .2W .33W .5W .75W 1W 1.5W 2W
- Pripadajoče mejne napetosti: 150V 250V 350V 450V 500V 650V 1kV
(čim večja je moč, tem večje so dimenzije in s tem mejna napetost V_L !)
- Šum: odvisen od velikosti upornosti in kvalitete tehnologije (slabša tehnologija daje lahko tudi večji šum od navedenih vrednosti) :
 - $10\Omega \rightarrow 0.1\ \mu\text{V/V}$
 - $10\text{k}\Omega \rightarrow 0.2\ \mu\text{V/V}$
 - $1\text{M}\Omega \rightarrow 1\ \mu\text{V/V}$
- Temperaturni koeficient upornosti/ $TK_R/$: negativen, raste z R_n (gl. pogl. TK_R) :

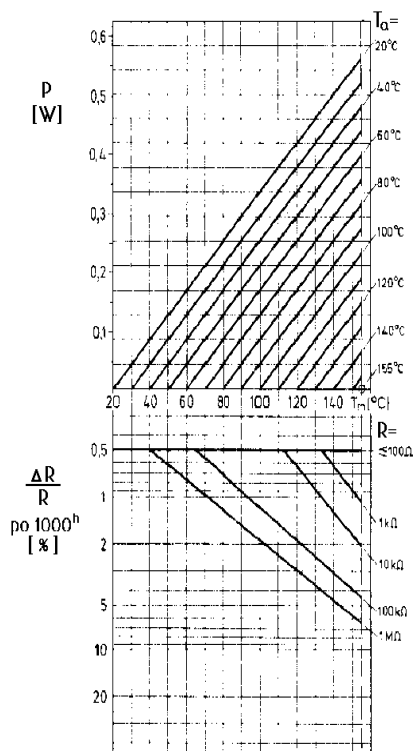
R_n	TK_R
$27\Omega \div 100\text{k}\Omega$	$-150 \div -600 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$
$> 100\text{k}\Omega$	$-200 \div -800 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Tipično odvisnost temperaturnega koeficienta upornosti od velikosti upornosti podaja diagram na Sl 2.36a.
- časovna stabilnost: gl. nomogram stabilnosti na Sl 2.36b, razlaga je podana v pogl. Nestabilnost !
- Obremenitve: podane bodo relativne spremembe upornosti pri standardnih obremenitvah (Pogl.1, Staranje) za srednje upornosti okrog $R_n = 10\text{k}\Omega$.
 - 1.Električna obremenitev: $\Delta R/R = +1\%$
 - 2.Temperaturna obremenitev: $\Delta R/R = +1\%$
 - 3.Obremenitev z vlago: $\Delta R/R = +0.7\%$

Aplikacije: Ogljenoplastni upori so relativno ceneni, vendar ne preveč kvalitetni elementi. Srečamo jih v raznih neprofesionalnih elektronskih napravah (enostavni radio in TV aparati, telefoni, računalniki itd.).



a)



b)

SI 2.36 Temperaturni koeficient upornosti (a) in stabilnost (b) pri ogljenoplastnih uporih

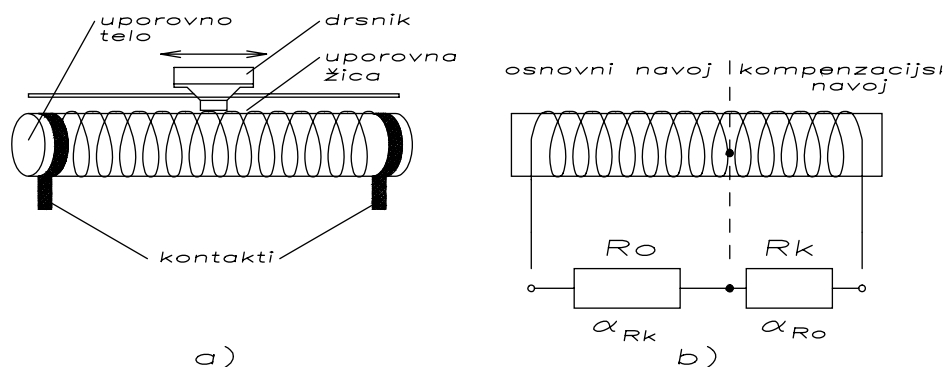
Tipične lastnosti metalplastnih (MF) uporov

- Območje upornosti/ R_n / : $1 \Omega \div 3 M\Omega$
- Tolerance : 5%(E24) 2%(E48) 1%(E96) 0.5%(E192)
(MF natančnejši kot CF !)
- Maksimalna temperatura/ T_{max} / : $175^\circ C$
(boljše od CF, omogoča večje P_n za iste dimenzije, manjše dimenzije za isto P_n)
- Nazivne moči/ P_n / : 0.33W 0.50W 0.75W 1W 1.5W
- Pripadajoče mejne napetosti/ V_L / : 250V 250V 350V 500V 650V
- Šum : odvisen od velikosti upornosti, nižji kot pri CF uporih!
 - $< 50k\Omega \rightarrow < 0.1 \mu V/V$
 - $< 500k\Omega \rightarrow < 0.3 \mu V/V$
 - $> 500k\Omega \rightarrow < 0.5 \mu V/V$
- Obremenitve: precej stabilnejši od CF uporov ! Tipično/ $R=10k\Omega$ /:
 1. Električna obremenitev: $\Delta R/R = +0.15\%$
 2. Temperaturna obremenitev: $\Delta R/R = +0.2\%$
 3. Obremenitev z vlago: $\Delta R/R = +0.3\%$

Aplikacije: V splošnem so metalplastni upori boljši od ogljenoplastnih in jih nadomeščajo, kadar so zahtevane boljše lastnosti kot npr. večja točnost oz. nižje tolerance, večja časovna stabilnost, nižji TK_R itd. Metalplastne upore najdemo v zahtevnejših elektronskih napravah kot so npr. računalniki, telekomunikacijska oprema, merilni instrumenti itd.

2.3.3 ŽIČNI UPORI

Strukturo tipičnega žičnega upora prikazuje SI 2.37a. Na keramično uporovno telo, običajno cilindrične ali kvadraste geometrije, je navita uporovna žica iz primerne materiala. Upor je zaščiten proti vplivom okolice s kvalitetnim, visokoodpornim površinskim premazom (zastekleno, emajlirano, cementirano itd.). Včasih so ovoji uporovne žice delno odkriti (SI 2.37a), tako da jih lahko kontaktira premičen drsnik, kar omogoči nastavljanje upornosti elementa.



SI 2.37 Struktura žičnega upora (a) in temperaturna kompenzacija (b)

Lastnosti žičnih uporov so določene predvsem z lastnostmi uporovnega materiala žice. Tabela 3 prinaša nekaj osnovnih podatkov za nekatere najpogostejše uporovne materiale.

Tabela 5 Uporovne lastnosti nekaterih uporovnih materialov za žične upore ($T = 0 \div 100^\circ\text{C}$)

Material	ρ [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$]	TK_R [$10^{-6} / ^\circ\text{C}$]	T_{max} [$^\circ\text{C}$]
NiCr	1	+100 ÷ +200	1000
manganin	0.5	+5 ÷ +30	200
konstantan	0.5	-5	500

Visoka maksimalna dopustna temperatura NiCr (1000°C!) pomeni, da ta material omogoča veliko disipacijo moči ($P_n = T_{\text{max}} - T_a / R_{\text{th}}$) in bo zato primeren za izdelavo žičnih uporov za velike moči.

Nizek temperaturni koeficient manganina in konstantana bo omogočal izdelavo preciznih visokostabilnih uporov. Zaradi nizke maksimalne temperature manganina, ki je posledica oksidacije tega materiala, ki se začne že pri zelo nizkih temperaturah okrog 70°C, srečamo zato v praksi največkrat konstantan.

Manganin srečamo pogosto v povezavi s konstantanom pri temperaturno kompenziranih uporih, kjer izkoristimo nasprotni predznak temperaturnih sprememb upornosti pri obeh materialih (SI 2.37b) : kolikor enemu navitju upornost zaradi temperaturne spremembe zraste, drugemu upade

$$\begin{aligned}
 R(T) &= R_{o20} (1 + \alpha_{Ro} \Delta T) + R_{k20} (1 + \alpha_{Rk} \Delta T) = \\
 &= (R_{o20} + R_{k20}) \left(1 + \frac{\alpha_{Ro} R_{o20} + \alpha_{Rk} R_{k20}}{R_{o20} + R_{k20}} \Delta T \right) = \text{const}
 \end{aligned}
 \tag{2.56}$$

Preprost račun pokaže, da se celotna upornost kompenziranega upora pri neki spremembi temperature ne bo spremenila, če je člen pri ΔT enak 0 oz. če sta upornosti obeh navitij v obratnem razmerju temperaturnih koeficientov

$$\frac{R_{k20}}{R_{o20}} = - \frac{TK_{Ro}}{TK_{Rk}}
 \tag{2.57}$$

Aplikacije: V splošnem žične upore srečamo redkeje od plastnih uporov zaradi zahtevnejše in dražje tehnologije ter s tem višje cene, večjih dimenzij in slabšega vf delovanja.

V posebnih primerih so žični upori boljši od plastnih: kadar je zahtevana večja točnost in stabilnost, nižji temperaturni koeficient, višje temperature oz. moči in nizek šum.

Pregled žičnih uporov

Žične upore razdelimo običajno v tri skupine:

I. Precizni žični upori

Struktura je največkrat enoslojno navitje na keramičnem telesu, zaščiteno s plastjo laka in včasih hermetizirano v ohišju.

- Območje upornosti/tipično/ : $1 \Omega \div 57 \text{ k}\Omega$
- Tolerance : 0.5% 0.25% in manj
- Maksimalna temperatura : odvisno od materiala, gl. Tabela 3 (v splošnem višja kot pri plastnih uporih !)
- Nazivne moči : 0.4W 1.8W
- Temperaturni koeficient upornosti : $< 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (zelo majhen!)
- Obremenitve: 1. Električna obremenitev: $\Delta R/R < 0.25\%$
- 2. Obremenitev z vlago: $\Delta R/R < 0.25\%$

Aplikacije : Kot kažejo gornji podatki, so precizni žični upori zelo stabilni elementi s skoraj zanemarljivimi efekti staranja! Zato jih srečamo v profesionalnih elektronskih napravah pri nižjih frekvencah (merilni instrumenti, telekomunikacija itd.).

II. Nizkoohmski žični upori :

Struktura je v tem primeru običajno v steklo zataljena uporovna žica s pocinjenimi kontakti (za manjše moči) ali enoslojno uporovno navitje na keramičnem telesu (za večje moči). V praksi jih lahko uspešno improviziramo tudi sami, če razpolagamo z ustrežno uporovno žico. Trimanje točne nizkoohmske vrednosti izvedemo s počasnim cinjenjem žice od enega kontakta proti drugemu in sprotno meritvijo upornosti.

- Območje upornosti : $0.1 \Omega \div 10 \Omega$
- Tolerance : 10%
- Nazivne moči : $1W \div 2W$
- Maksimalna temperatura : odvisno od materiala (gl. Tabela 3 !)
- Temperaturni koeficient : $-50 \div +150 [10^{-6}/^{\circ}C]$

Aplikacije : kjer potrebujemo nizke vrednosti upornosti ob ostalih dobrih lastnostih žičnih uporov (stabilnost itd.), z možnostjo trimanja (npr. v transistorskih vezjih za stabilizacijo delovne točke močnostnih transistorjev itd.).

III. Žični upori za večje moči :

Struktura je v tem primeru največkrat uporovno navitje na keramičnem telesu, zalito v primerno zaščito (cement, steklo, emajl). Včasih je zaradi večjega odvajanja moči dodano še hladilno telo. Pri uporih za zelo velike moči lahko kroži skozi upor hladilna tekočina, ki na odmaknjenih toplotnih izmenjevalcih oddaja odvečno energijo.

- Območje upornosti : odvisno od moči
 - srednje moči (1W \div 10W): $5 \Omega \div 27 k\Omega$ (cementirani)
 $5 \Omega \div 100k\Omega$ (emajlirani)
 - večje moči (10W \div 250W): $1 \Omega \div 11 k\Omega$ (cementirani)
 $60 \Omega \div 120 k\Omega$ (emajlirani)
- Tolerance : 10% , 5%
- Maksimalna temperatura : $400^{\circ}C$
- Temperaturni koeficient upornosti : $-50 \div +160 [10^{-6}/^{\circ}C]$

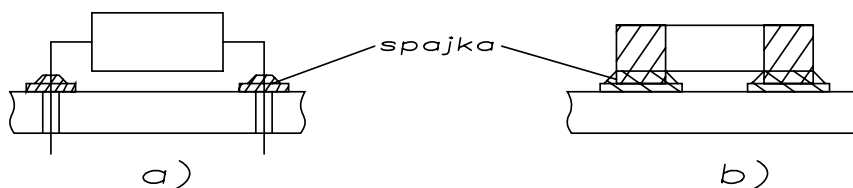
Aplikacije: Žične upore za večje moči uporabljamo v močnostnih električnih vezjih in napravah, kadar so zahteve po disipaciji velikih moči na relativno majhnih volumnih.

2.3.4 SPECIALNI UPORI

2.3.4.1 SMD UPORI

V modernih tiskanih vezjih (PCB - Printed Circuit Board) klasične elemente in tehnologijo, ki je osnovana na montaži s spajkanjem izvodov elementa v ustrezne metalizirane luknje v tiskanem vezju (SI 2.38a), vse bolj nadomešča modernejša SMD (Surface Mounted Device) tehnologija (SI 2.38b). Pri SMD tehnologiji element nima izvodov in se kontakti elementa spajkajo direktno na metalizacijske površine tiskanega vezja. Različni testi kažejo, da SMD način montaže prevladuje nad klasičnim v pogledu zanesljivosti. Ker smo priča stalnemu porastu kompleksnosti vezij, tudi tiskanih, o čemer nas prepriča že pogled v notranjost najpreprostejšega osebne računalnika, je seveda večja zanesljivost ultimativna zahteva, ki diktira smer razvoja na vseh področjih elektronike. Zato lahko z gotovostjo trdimo, da bo šel razvoj tiskanih vezij, vsaj kompleksnejših, v smeri SMD.

V nadaljevanju si bomo ogledali nekaj modernih miniaturnih diskretnih uporov za vgradnjo (čip uporov), kot jih srečamo pri SMD tehnologijah. Miniaturnost kot vedno tudi pri teh elementih prinese določene prednosti (npr. majhne dimenzije in teža elementov in naprav, boljše vf lastnosti itd.) a seveda tudi nekatere slabosti (npr. nižje nazivne moči in napetosti itd.).



SI 2.38 Pritrditev elementa na tiskano vezje: a) klasično in b) SMD tiskano vezje

I. Cilindrični čip upori

Strukturo upora prikazuje SI 2.39a. Osnovni tehnološki koraki pri izdelavi tega upora so podobni kot pri izdelavi plastičnih uporov, le da so tu kontakti izvedeni z vtisnjenimi kovinskimi kopicami. Upore srečamo v dveh izvedbah: ogljenoplastni (CF) in metalplastni (MF). Nekateri tipični podatki (npr. MELF RESISTOR) :

- Nazivne upornosti/ R_n / : $10 \Omega \div 1 M\Omega$
- Nazivna moč/ P_n pri $T_a = 70^\circ C$ / : $1/4 W$
- Mejna napetost/ V_L / : $250 V$
- Tolerance, degradacija pri standardnih obremenitvah in temperaturni koeficient so podani v Tabeli 4.

Tabela 6: Cilindrični čip upori

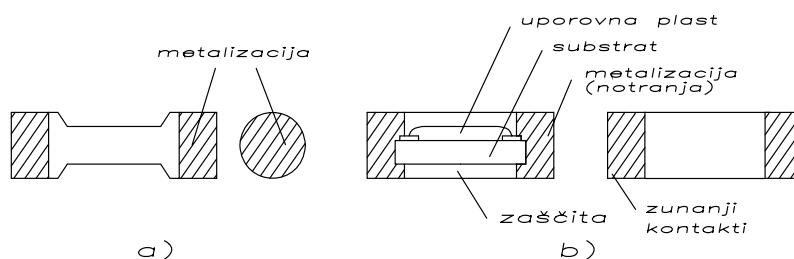
VRSTA UPORA	TOLERANCE	DEGRADACIJA	$TK_R [10^{-6}/^\circ C]$
CF	5%(rjavi)	< 2%	-250 ÷ -800
MF	1%(zeleni)	< 1%	-100 ÷ +100

II. Kvadrasti čip upori

Strukturo upora prikazuje SI 2.39b. V tem primeru sta notranja metalizacija in uporabna plast izdelani s postopkom tiskanja (Pogl.2, Specialni upori), zunanja metalizacija pa enako kot v prejšnjem primeru vtisnjene kovinske kapice. Nekateri osnovni podatki (npr.Philips) :

- Nazivne upornosti/ R_n / : $1 \Omega \div 10 M\Omega$
(obstoja tudi kratkostični (premostitveni) upor 0Ω /jumper/ s podatki $R < 50m\Omega$ pri $I < 2A$!)
- Tolerance : 5% , 2%
- Nazivna moč/ P_n pri $T_a = 70^\circ C$ / : $1/4 W$
- Mejna napetost/ V_L / : $200 V$
- Degradacija pri standardnih bremenitvah $\Delta R/R$: $< 1.5\%$
- Temperaturni koeficient upornosti $/TK_R/$: $< +200 \cdot 10^{-6}/^\circ C$

Aplikacije cilindričnih in kvadratnih čip uporov : Srečamo jih v zahtevnejših modernih kompleksnih SMD vezjih (npr. za profesionalnejše radio, TV in video aparate, ure, računalnike; medicinska, vojaška in telekomunikacijska oprema itd.).



SI 2.39 Cilindrični(a) in kvadrasti(b) čip upor

2.3.4.2 INTEGRIRANI UPORI

Za razliko od diskretnih miniaturnih (čip) uporov so integrirani upori sestavni deli integriranega vezja, organsko vgrajeni v samo vezje. Tudi tu velja, da miniaturnost teh elementov prinese nekatere prednosti (majhne dimenzije in teža, dobre vf lastnosti) a seveda omejitvev na male moči!

Mikroelektronske elemente in vezja razvrščamo običajno glede na tehnologijo izdelave v več skupin :

I. Hibridna integrirana vezja

Substrat je v tem primeru ploščica visokokvalitetne keramike, vezje pa je izdelano z depozicijo metalnih in uporabnih plasti na površini substrata. Aktivne in druge komponente so dodane v obliki prispajkanih chipov.

Hibridna integrirana vezja oz. elemente delimo glede na tehnologijo izdelave v dve grupi : tankoplastna (SI 2.40a) in debeloplastna (SI 2.40b).

II. Polprevodniška (monolitna) integrirana vezja

Substrat je v tem primeru monokristal primernega polprevodnika (Si, GaAs itd.). Vezje, ki je izdelano s polprevodniškimi tehnološkimi postopki kot npr. oksidacija, fotolitografija, difuzija itd., je izdelano v celoti, aktivne in pasivne komponente, na in v polprevodniškem substratu (SI 2.38).

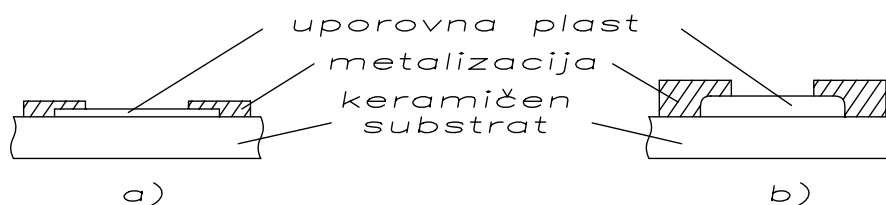
V nadaljevanju si pogledjmo osnovne strukture in lastnosti uporov, ki jih srečamo v integriranih vezjih. Hkrati bomo spoznali tudi nekatere osnovne značilnosti ustreznih družin oz. tehnologij integriranih vezij!

I. Tankoplastni upori

Strukturo tankoplastnega upora prikazuje SI 2.40a: na keramičen substrat je nanešena tanka uporovna plast. Nanašanje je izvedeno z neko vakuumsko depozicijo (naparevanje z uporovno ladjico ali elektronskim topom, naprševanje) primernega uporovnega materiala (nizek TK_R , $\Delta R/R$ itd.) kot so npr. razne metalne legure ali kermeti (kot pove če ime, mešanice keramik in metalov). Plasti so nanešene uniformno preko celotne površine ploščice, tipične debeline plasti so okrog $1\mu\text{m}$. Geometrija uporovne proge je nato izdelana s fotolitografskimi postopki (nanos fotoresista, presvetlitev skozi masko, razvijanje - presvetljeni fotoresist se odtopi, odjedkanje odkritih površin, odstranitev preostalega fotoresista). Nato se procedura ponovi še z metalizacijo (nanašanje, fotolitografija).

II. Debeloplastni upori

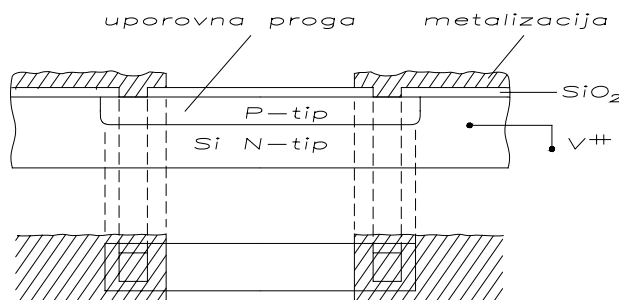
Strukturo debeloplastnega upora prikazuje SI 2.40b: na keramičen substrat je s postopkom tiskanja nanešena uporovna pasta primernih lastnosti (nizek TK_R , $\Delta R/R$ itd.) dane geometrije. Tipične debeline plasti so v tem primeru nekaj deset μm . Uporovno plast nato zapečemo na predpisani temperaturi in ambientu. Nato se procedura ponovi še z metalizacijo.



SI 2.40 Struktura tankoplastnega(a) in debeloplastnega(b) upora

III. Polprevodniški upori

Strukturo polprevodniškega upora prikazuje SI 2.41: substrat je v tem primeru monokristal primernega polprevodnika. S postopkom selektivnega vnašanja primesi v polprevodnik, z difuzijo ali implantacijo skozi oksidno masko, izdelamo uporovno progo nasprotnega tipa od osnovnega substrata. Oksidna maska, kontaktne odprtine in metalizacija so izvedene s fotolitografskimi postopki. Depozicija tankih plasti poteka enako kot pri tankoplastnih uporih. Upor mora biti med delovanjem integriranega vezja električno ločen od substrata in ostalih elementov vezja, kar dosežemo z zaporno polarizacijo PN spoja upor - substrat. V primeru na SI 2.41 moramo torej substrat priključiti na najbolj pozitiven potencial V^{++} , ki se lahko pojavi med delovanjem integriranega vezja!



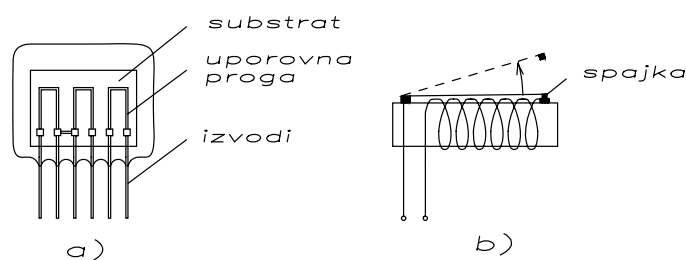
SI 2.41 Struktura polprevodniškega integriranega upora

2.3.4.3 HIBRIDNA VEZJA

V tem primeru gre za hibridna tankoplastna ali debeloplastna uporovna vezja z dobrimi uporovnimi lastnostmi. Na keramičen substrat je nanešena kvalitetna uporovna plast, pritrjene žičke za izvode in nato zalito v zaščitni silikonski lak in fenolno smolo (SI 2.42a). Vezje lahko vsebuje večje število uporov, včasih že v notranjosti smiselno povezanih (delilniki itd.) ter večje število izvodov. Nekaj osnovnih lastnosti:

- Nazivne upornosti $/R_n/$: $10 \Omega \div 1 M\Omega$
- Tolerance: 1% , 0.5% , 0.2% , 0.1% (zelo precizni!)
- Nazivne moči $/P_n$ pri $T_a = 70^\circ C/$: $1/8 W \div 1/2 W$
- Obremenitve $/\Delta R/R/$: $< 0.5\%$
- Temp. koeficient upornosti $/TK_R/$: $< +50 \cdot 10^{-6} /K$ (zelo majhen!)
- Dobre vf lastnosti : $C < 0.2 pF$, $Z/R(10MHz) < 0.8$ (za $10k\Omega$ upor)

Aplikacije: Hibridna uporovna vezja srečamo v profesionalnih napravah, kadar je zahtevana velika natančnost glede upornosti (nizke tolerance), visoka stabilnost, nizek TK_R , dobre vf lastnosti, toda nizke moči.



SI 2.42 Hibridna uporovna vezja (a) in obnovljivi zaščitni upori (b)

2.3.4.4 ZAŠČITNI UPORI

Zaščitni upor (Fusible Resistor) ima osnovno lastnost, da pri električni preobremenitvi tok prekine. Prekinitev toka je posledica previsoke temperature, ki nastopi zaradi previsoke moči. Osnovna zahteva za varno delovanje zaščitnega upora je, da mora biti prekinitev toka izvršena brez plamena ali iskrenja, zaradi vedno prisotnega lahko vnetljivega prahu ali morebitne eksplozivne atmosfere. Obstojata dva tipa zaščitnih uporov:

1. Neobnovljivi zaščitni upor: Pri takem uporu v primeru prekoračitve predpisanega toka skozi upor uporabna plast zaradi pregretja enostavno, brez plamena izpari! Nekaj primerov:

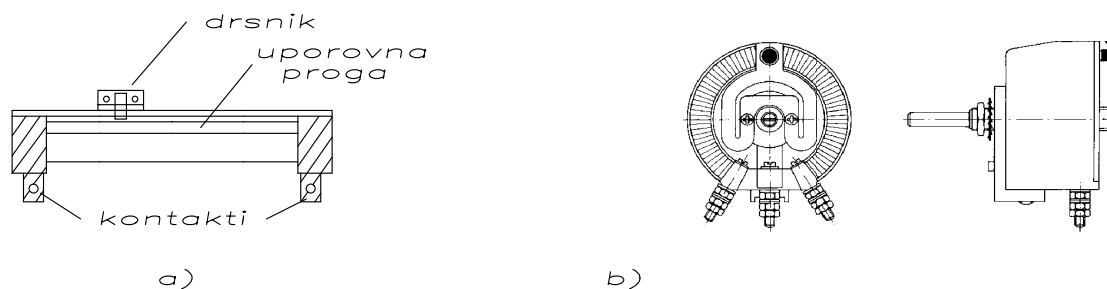
- Proizvajalec:	ISKRA	PHILIPS
- Uporovna plast:	CF	MF
- Nazivne upornosti/ R_n / :	2.2 Ω ÷ 5.1 k Ω	1 Ω ÷ 15 k Ω
- Tolerance:	5%	5%
- Nazivne moči/ $P_n, T_a=70^\circ\text{C}$ / :	0.33 W ÷ 0.75 W	0.33 W ÷ 0.5 W
- Obremenitve/ $\Delta R/R$ / :	< 1.5%	< 1%

2. Obnovljivi zaščitni upor: Strukturo takega upora prikazuje Sl 2.42b. Pri določeni električni obremenitvi tak upor doseže temperaturo tališča spajke, s katero je prispejkan elastično vpet kontakt. Posledica je razklenitev kontaktov in s tem prekinitev toka. Upor lahko obnovimo, če kontakt ponovno prispajkamo. Seveda je treba paziti, da spajkamo vedno z enako spajko, saj imajo različne spajke z različnim razmerjem osnovnih sestavin Pb/Sn/Ag tudi različne temperature tališča ! Za nižje nazivne moči oz. temperature vzamemo spajke z nižjim tališčem (več Pb, Sn - mehke spajke), za višje moči pa spajke z visokim tališčem (več Ag - trde spajke).

2.3.5 NASTAVLJIVI UPORI

Nastavljivi upori omogočajo ročno nastavitev ohmske upornosti elementa. Običajna izvedba nastavljivega upora je sestavljena iz uporabne proge, po kateri drsi pomičen drsnik in s svojo lego določa upornost elementa (Sl 2.43). Nastavljive upore ločimo v več skupin :

- Glede na značaj nastavljanja delimo nastavljive upore na potenciometre (za vsakodnevna nastavljanja kot npr. jakost zvoka v radioaparatu; drsnik je dostopen direktno preko zunanega gumba) in trimere (za občasna nastavljanja kot npr. nastavitev delovne točke nekega transistorja; lego drsnika nastavimo z izzvičajem v notranjosti naprave).
- Glede na pomik ločimo preme (Sl 2.43a) in rotacijske (Sl 2.43b) potenciometre.



SI 2.43 Premi (a) in rotacijski (b) potenciometer

- Glede na odvisnost upornosti od lege drsnika ločimo (SI 2.43) :

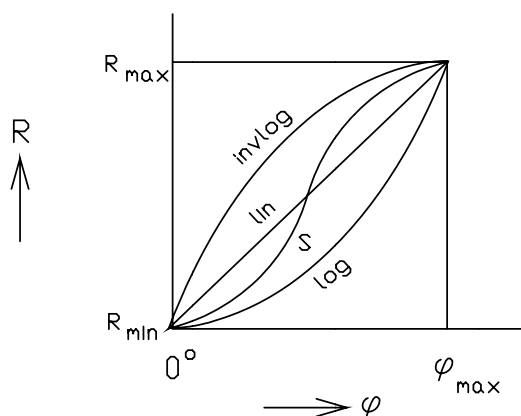
a) **linearni potenciometri** : upornost je linearno odvisna od zasuka

$$R(\varphi) = R_{\min} + K\varphi \quad (2.58)$$

b) **nelinearni potenciometri** : upornost je nelinearno odvisna od zasuka; npr. pri logaritemskem potenciometru

$$\log \frac{R}{R_{\min}} = K\varphi \quad (2.59)$$

Logaritemski potenciometer je primeren za regulacijo jakosti zvoka zaradi logaritemske občutljivosti človeških čutil. Včasih so primerni tudi drugačni potenciometri (SI 2.44) : inverzni logaritemski, S, itd.



SI 2.44 Karakteristike nekaterih potenciometrov

- Glede na izvedbo uporovne proge ločimo plastne in navite žične potenciometre.
- Glede na občutljivost ločimo grobe oz. direktne (1 obrat gumba pomeni 1 obrat drsnika) ter precizne oz. indirektne (s prenosom - N obratov gumba povzroči 1 obrat drsnika).
- Glede na kvaliteto ločimo neprofesionalne (ogljena uporovna plast, ogljeni ali kovinski drsnik) ter profesionalne (kermetna uporovna plast na korundni keramiki) potenciometre.

Osnovni podatki pri nastavljivih uporih

Proizvajalci podajajo za svoje nastavljive upore poleg podatkov, ki so bili že obravnavani pri fiksnih uporih, še nekatere druge podatke, značilne le za te elemente:

- Nazivna upornost/ R_n /: maksimalna upornost, ki jo lahko nastavimo s potenciometrom
- Nazivna moč/ P_n /: maksimalna dopustna moč, ne glede na lego drsnika
- Mejni tok drsnika: maksimalni tok, ki lahko stalno teče skozi drsnik, ne glede na lego drsnika
- Vrtilni kot: maksimalni zasuk, ki ga omogoča izvedba (SI 2.40a). Tipične vrednosti so $200^\circ \div 300^\circ$, včasih pa tudi 360° (lahko sploh brez ustavitve).
- Življenjska doba potenciometra: od proizvajalca zajamčeno število pomikov drsnika od minimalnega odklona do maksimalnega odklona in nazaj, pri določeni obremenitvi (temperatura, vlaga, električna moč) ob predpisani minimalni degradaciji (npr. $\Delta R/R < 1\%$). Običajni neprofesionalni potenciometri prenesejo 10^{+4} , profesionalni pa $10^{+5} \div 10^{+7}$ takih pomikov.
- Šum: dodatno k šumom, ki so bili obravnavani pri uporih, se pri nastavljivih uporih javlja še dodatno šum zaradi kontakta drsnik - uporovna plast. Ta šum je različen za mirujoč in za gibajoč se drsnik. Običajno je največji od vseh šum gibajočega se drsnika.

Tipične lastnosti nekaterih pogostejših tipov potenciometrov podaja Tabela 7 (okrajšave: pot. - potenciometer, rot. - rotacijski, oglj. - ogljeni, pr. - premi, drs. - drsni, ker. - kermet, žič. - žični, nav. - naviti, močn. - močnostni).

Tabela 7 Tipične lastnosti nekaterih pogostejših tipov potenciometrov

Tip pot.	$R_n[\Omega]$	$P_n/70^\circ\text{C}$	$TK_R[10^{-6}/\text{K}]$	Karakteristika
rot.oglj.	220-4M7	0.1	+250	lin,log,invlog
pr.drs.oglj.	220-10M	0.1	+250	lin,log,invlog
rot.ker.	100-1M	0.5	+200	lin
rot.žič.nav.	2E2-22k	1-2	+100	lin
rot.močn.	0E5-10k	25-100	+200	lin
žič nav.				

REFERENCE

- 1) J.Furlan, osebni zapiski
- 2) C.L.Wellard, "Resistance and Resistors" , McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York, 1960.
- 3) C.A.Harper, "Handbook of Materials and Processes for Electronics", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, USA, 1970.
- 4) C.A.Harper, "Handbook of Components for Electronics", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, USA, 1977.
- 5) C.A.Harper, "HANDBOOK OF ELECTRONIC PACKAGING", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, USA, 1969.
- 6) M.Kaufman, A.H.Seidman, "HANDBOOK for ELECTRONICS ENGINEERING TECHNICIANS", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, USA, 1984.
- 7) č.A.Spasojevič, Z.V.Popovič, "ELEKTROTEHNIČKI I ELEKTRONSKI MATERIJALI", Naučna knjiga, Beograd, 1979.
- 8) O.Zinke, "Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe", Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1965.
- 9) S.Ristič, "ELEKTRONSKE KOMPONENTE", I.del, Univerzitet u Nišu, Niš, 1986.
- 10) A.Kralj, P.Šuhel, "ELEKTRONSKI SESTAVNI DELI IN SESTAVI", Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1989.
- 11) Iskra - Tovarna uporov Šentjernej, "Upori", 1986/87.
- 12) Philips Data handbook, "Fixed Resistors", Components and materials Book C13, 1986.
- 13) VTM, "Resistors", 1982/83.
- 14) S.M.Sze, "VLSI TECHNOLOGY", Mc-GRAWHILL BOOK COMPANY, USA, 1985.
- 15) King, "Electrical Noise", 1966.
- 16) A.van der Ziel, "NOISE", PRENTICE-HALL, INC., 1954.
- 17) J.J.Freeman, "PRINCIPLES OF NOISE", JOHN WILEY & SONS, 1958.
- 18) W.R.Bennett, "ELECTRICAL NOISE", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, USA, 1960.
- 19) G.Klein, J.J.Zaalberg van Zelst, "PRECISION ELECTRONICS", Philips Technical Library, Eindhoven, 1967.
- 20) G.Lipnjak, L.Gašpar, "UTJECAJ PRIMJENE TEHNOLOGIJE POVRŠINSKE MONTAŽE NA TISKANE PLOČE", Informacije MIDEM, Ljubljana, 1991.
- 21) ARCOL, "Hochlast-Widerstände in Kühlgehäuse", England.
- 22) Iskra - Tovarna uporov Šentjernej, "Uporovna vezja".
- 23) VALVO, "Kondensatoren, Widerstände, Quarze Produktprogramm", Hamburg, 1984.
- 24) Iskra - Tovarna uporov Šentjernej, "Potentiometers", 1980/81.
- 25) Iskra - Tovarna uporov Šentjernej, "Nastavitveni keramični potenciometri", 1991.
- 26) A.Bar-Lev, Semiconductors and Electronic Devices,ISBN 0-13-825209-2 Prentice Hall, 1993