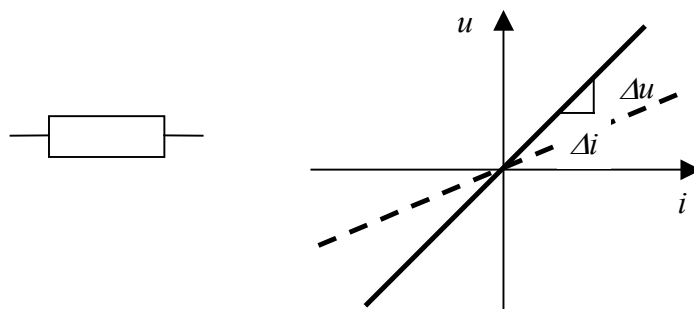


Linearni upor

Upor raznovrstnih tehnoloških izvedb sodi med najpogostejše elemente v elektronskih napravah. Kadar se njegova nazivna upornost R_N ne spreminja v odvisnosti od pritisnjene napetosti ali toka skozenj temveč zgolj od ostalih vplivnih veličin (temperatura, napetost,...), govorimo o linearnem uporu. Njegov simbol in statično $u-i$ karakteristiko kaže slika 1.

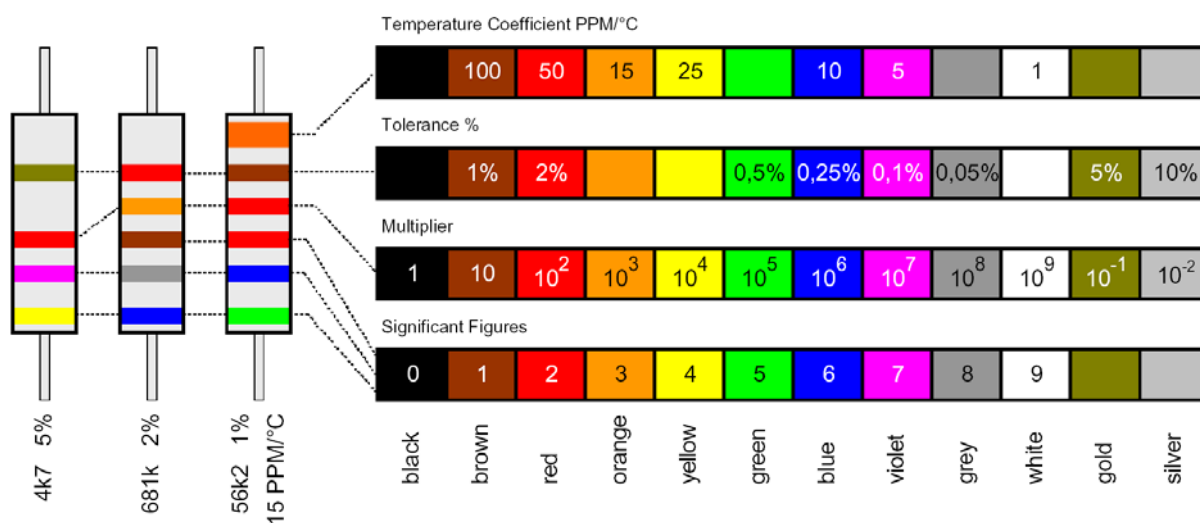


Slika 1: Simbol in statična $u-i$ karakteristika linearnega upora

Njegovo osnovno lastnost t.j. nazivno upornost podajajo proizvajalci z barvno kodo ali z alfanumeričnim zapisom. Pogosto ji je dodana še označba tolerančnega območja in temperaturni koeficient upornosti. To je neizogibno, saj noben realen upor ni povsem neodvisen od vplivnih veličin, kot je temperatura, in ga ni možno izdelati s točno podano upornostjo.

1) Označevanje uporov z barvno kodo po IEC predpisu, s katero podajamo:

- nazivno upornost,
- toleranco upornosti in
- temperaturni koeficient upornosti.



Slika 2: Sistem označevanja z barvno kodo

2) Označevanje uporov z alfanumerično IEC kodo, s katero podajamo nazivno upornost in toleranco upora:

Pri tem srečamo več možnosti:

- za oznako nižjih upornosti je na uporu natiskana številka, ki podaja nazivno upornost v ohmih. Včasih je zaradi jasnosti dodana še črka R ali E
primer: Upor 75 Ω ...oznaka na uporu: 75, 75R ali 75E
- za oznako višjih upornosti so dodane še ustrezne črke, ki podajajo velikostni razred nazivne upornosti:
primer: Upor 75 k Ω ...oznaka na uporu: 75K
Upor 75 M Ω ...oznaka na uporu: 75M
- kadar nastopa v vrednosti upornosti decimalna vejica, je v oznaki na uporu le-ta nadomeščena z ustrezno črko:
primer: Upor 0,15 Ω ...oznaka na uporu: 0R15
Upor 5,5 Ω ...oznaka na uporu: 5R5
Upor 1700 Ω ...oznaka na uporu: 1K7

Opisanim oznakam za nazivno upornost sledi oznaka za toleranco upora, ki je podana s črko.

Tabela 1: Oznake za tolerance

B	0,1 %	K	10 %
C	0,25 %	M	20 %
D	0,5 %		
F	1 %	Q	-10 do +30 %
G	2 %	T	-10 do +50 %
J	5 %	S	-20 do +50 %

Tolerančni razredi in Renardove lestvice

Renardove lestvice podajajo optimalen, standardiziran razmik nazivnih vrednosti upornosti znotraj dekade (od 1 do 10) za vsak tolerančni razred uporov, kot kaže spodnja tabela.

Tabela 2: Renardove lestvice

lestvica	E6	E12	E24	E48	E96	E192
korak	1,47	1,21	1,10	1,05	1,02	1,01
toleranca	20%	10%	5%	2%	1%	0,5 %

število členov na dekada

Tabela 3: nazivne vrednosti najpogosteje uporabljenih Renardovih lestvic

E102	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			178			298			505			856			
105	105	105	178	178	178	301	301	301	511	511	511	866	866	866	
106			180			305			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					
126			213			361			612			E24	E12	E6	E3
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			

Temperaturni koeficient upornosti je z dimenzijskega stališča zelo pomemben podatek, ki podaja spremembo upornosti upora zaradi povečane temperature. Temperaturno odvisnost podajamo s temperaturnimi koeficienti (TK_R ali α_R), ki so snovna lastnost materiala iz katerega je izdelana prevodna struktura upora.

Tabela 4: Specifična upornost in temperaturni koeficient

material	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	TK_R ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
srebro	0,016	/
baker	0,018	4300
zlato	0,022	3800
aluminij	0,028	4200
Ni	0,075	6500
NiCr 80/20	1	100
C	40	-200

Upornost je pri temperaturi, ki je različna od referenčne T_0 , podana kot

$$R(T) = R(T_0)[1 + TK_R(T - T_0)].$$

Pri vgradnji je izbira ustreznega upora dodatno podrejena naslednjim mejnim vrednostim: **nazivni moči, maksimalni temperaturi in mejni napetosti.**

Nazivna moč upora je definirana kot tista maksimalna dopustna moč električne obremenitve za podano temperaturo okolice (ambienta) (T_a), ki jo upor še prenese brez degradacije.

Nazivna moč je odvisna od termičnih lastnosti upora. Te lastnosti podajata osnovna termična podatka upora:

- termična upornost R_{th} (podaja učinkovitost odvajanja sproščene toplote od upora v okolico, enota $^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
- maksimalna temperatura T_{max} (maksimalna temperatura, ki jo materiali v upor pri dolgotrajnem obratovanju še prenesejo brez degradacije. Tipične vrednosti se gibljejo v razponu od 150 do 250 $^{\circ}\text{C}$.)

Zaradi porušitve kemičnih in metalurških lastnosti materiala je temperatura navzgor omejena. Maksimalna dovoljena temperatura v nobenem primeru ne sme biti presežena.

Proizvajalci podajajo nazivno moč upora pri temperaturi okolice 70 $^{\circ}\text{C}$. Pri priključitvi električne obremenitve se začne v upor sproščati toplota, ki z upora prehaja na tri načine:

- s sevanjem,
- s prevajanjem (prenos toplote po mirujoči snovi) in
- s konvekcijo (prenos toplote s tokom tekočine).

V trenutku, ko nastopi pulz izgubne moči (ko steče skozi upor tok) začne temperatura uporabnega materiala eksponentno naraščati. Vzrok tega je toplotna kapaciteta upora v kateri se akumulira del izgubne električne moči, ki povzroča porast temperature spoja

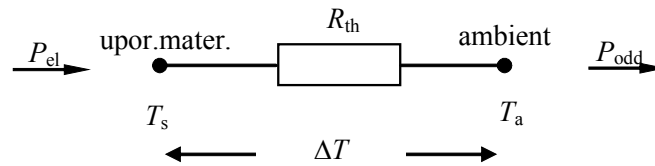
$$P \cdot dt = C_{th} \cdot d\vartheta. \quad (*)$$

Toplotna kapaciteta telesa z volumnom V , specifično gostoto snovi ρ in specifično toploto c je v splošnem

$$C_{th} = V \cdot \rho \cdot c \left[\frac{\text{Ws}}{\text{K}} \right]. \quad ()$$

Preostali del izgubne električne moči pa se v obliki termičnega toka prenese na ohišje (hladilno telo in na koncu na okolico).

Ko se temperatura ustali, obstoji na stični ploskvi termičnega spoja (uporovni material-ambient) temperaturna razlika.



Slika:

Toplotna upornost telesa s površino S , ki je pravokotna na smer prehajanja toplote, z debelino d in s poznano toplotno prevodnostjo λ je v splošnem

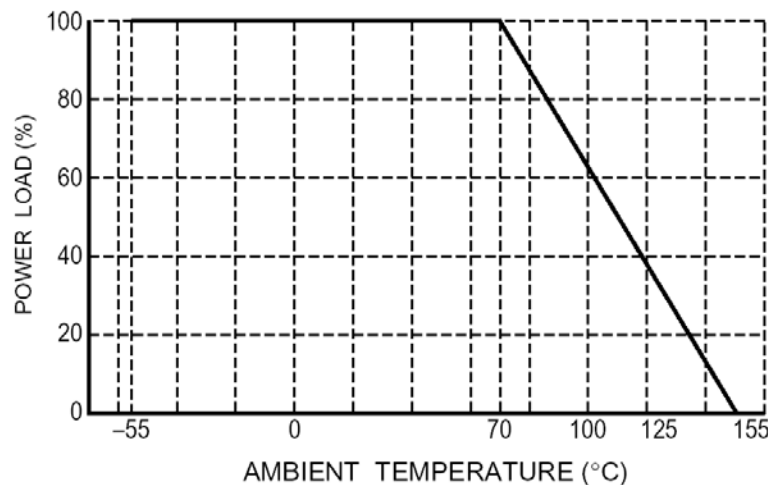
$$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot S} \left[\frac{K}{W} \right].$$

Če se v nadaljevanju omejimo le na odvod toplote s prevajanjem, lahko za temperature površine upora (do približno 100°C) predpostavimo, da je odvajanje toplote premosorazmerno temperaturni razliki med površino (surface) upora in okolico.

$$P_{odd} = \frac{T_s - T_a}{R_{th,s-a}}$$

Konstanta proporcionalnosti je enaka termični upornosti $R_{th,s-a}$ med dvema mejnima površinama z različno temperaturo.

Ker se - ob nespremenjeni električni obremenitvi P_{odd} - z rastočo temperaturo okolice zmanjšuje sposobnost odvajanja zadostne količine toplote, obstaja nevarnost, da bo temperatura upora presegla maksimalno dopustno. V ta namen moramo pri višjih temperaturah okolice obremenitev upora zmanjšati. Znižanje dopustne obremenitve pri povečani temperaturi ($>70^{\circ}\text{C}$) proizvajalci podajajo s pripadajočim diagramom.

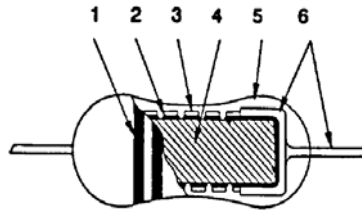


Slika 3: Zmanjšanje maksimalne dopustne obremenitve

Naloga, ki jih izpolnjujejo linearni upori v elektronskih napravah, kot tudi obratovalni pogoji so raznovrstni. Da bi jim čim učinkoviteje zadostili, uporabljamo upore iz različnih materialov in konstrukcijskih izvedb.

Ogljenoplastni upori (CF)

Kot uporovna plast je uporabljena mešanica ogljenih zrn, ki so jim dodana ustrezna lepila. Ta plast je nanešena na cilindrično keramično telo (4), ki tvori osnovo za mehansko trdnost elementa. Z oblikovanjem (3) uporovne plasti dosežemo želeno upornost. Na čelni ploskvi keramičnega telesa sta nato pritrjena kovinska poklopca ali pa sta nanešeni metalizacijski plasti, na kateri sta privarjena električna priključka (6). Pred zunanjimi vplivi (atmosferski vplivi, mehanske poškodbe) kot tudi za električno izolacijo je površina zaščitena z ustreznim lakom (5).



Slika 4:

Tabela 5: tipične vrednosti uporov z ogljeno uporovno plastjo

Območje upornosti	1 Ω do 1 M Ω
Maksimalna temperatura	155°C
Nazivne moči	0,2 W do 2 W
Mejne napetosti	150 V do 1 kV

Metalplastni upori (MF)

Metalplastni upori imajo v primerjavi z ogljenoplastnimi pri enaki velikosti večjo obremenljivost t.j. nazivno moč. Poleg tega jih lahko izdelamo z manjšimi tolerancami upornosti. Delimo jih na metaloksidne, kjer prevodno plast tvori kovinski oksid (npr. cinkov oksid), ter na metalfilmske. Pri slednjih je na površino keramičnega telesa nanešena kovinska plast, ki jo je nato možno oblikovati z zelo majhnimi odstopanji, kar je osnova za izdelavo preciznih uporov s toleranco manjšo od 0,01% in z majhnim temperaturnim koeficientom upornosti.

Tabela 6: tipične vrednosti metalplastnih uporov

Območje upornosti	1 Ω do 3 M Ω
Maksimalna temperatura	175°C
Nazivne moči	0,33 W do 1,5 W
Mejne napetosti	250 V do 650 V

Žični upori

Na keramično telo je navita uporovna žica iz primerne materiala (NiCr, manganin, konstantan), ki je na obeh koncih spojena na kovinska poklopca, na katera je nato privarjena priključna žica. Upor je zaščiten proti vplivom okolice s površinskim premazom (zastekleno, emajl, cementirano)

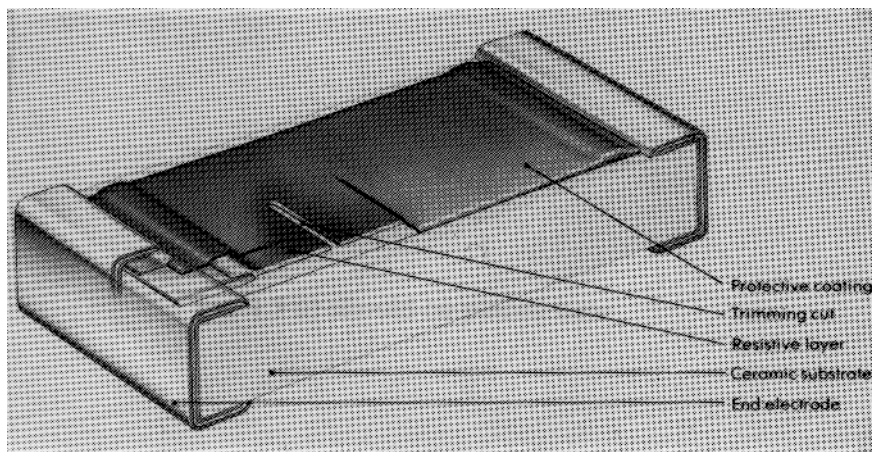
Žične upore pretežno uporabljamo v močnostni elektroniki kot upore z veliko nazivno močjo (nekaj 100 W), kar jim omogočajo uporabljene kovinske zlitine, ki vzdržijo zelo visoke obratovalne temperature.

Tabela: Primerjalna tabela lastnosti različnih izvedb linearnih uporov

resistor type	wire wound	carbon film	metal film	metal oxide film
resistance range	0.01 Ω ...10 Ω	1 Ω ...10M Ω	1 Ω ...10M Ω	1 Ω ...5M Ω
tolerance	0.001%...5%	2%...5%	0.005%...2%	2%...5%
stability	0.1%...1%	1%...3%	0.1%...0.3%	1%...4%
temperature coefficient ($10^{-6}/^{\circ}\text{K}$)	1...100	-200...-1200	2...100	200...400
failure rate ($10^{-9}/\text{h}$)	0.1...5	0.3...30	1...10	1...10
power rating	1W...1kW	0.1W...2W	0.1W...2W	0.5W...10W
impulse loading (relative)	very high	high	low	high
current noise (relative)	low	low	very low	low
max. operation temperature	150°C..300°C	125°C..155°C	150°C...175°C	175°C..250°C

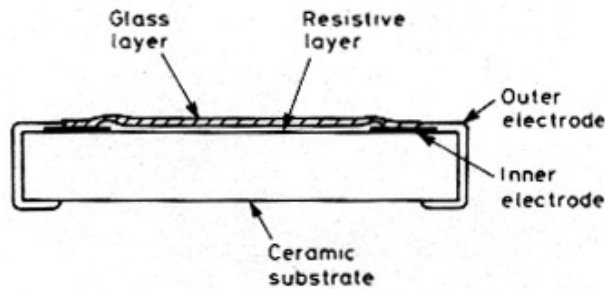
SMD upori (Surface mounted resistors)

SMD upori imajo pravokotno obliko, ki jo omogoča nosilno keramično telo. Uporovni material je navadno rutenijev oksid, ki je na keramično telo nanešen v obliki paste in nato utrjen pri visoki temperaturi. Upornost uporovne sledi se precizno zopet korigira z laserskim trimanjem.



Slika: Izgled SMD upora

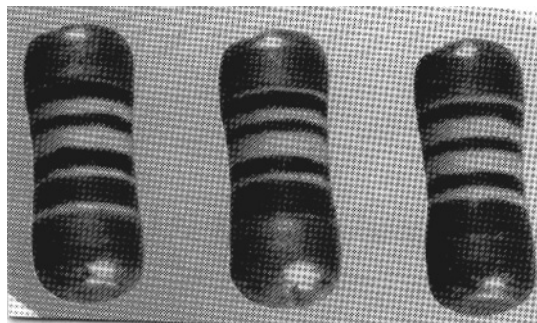
Pred zunanjimi vplivi je površina zaščitena s stekleno prevleko. Za pritrditev v vezje komponenta nima izvedenih žičnih priključkov, temveč v ta namen služita obe krajni kovinski elektrodi, ki sta zaradi čimmanjše kontaktne upornosti in zanesljivega spoja izvedeni v obliki dveh elektrod. Notranja elektroda je iz Ag ali iz Au. Zunanja elektroda je narejena iz AgPd ali iz difuzijskega sloja Ni prevlečenega z SnPb spojko.



Slika: Izvedba priključnih elektrod SMD upora

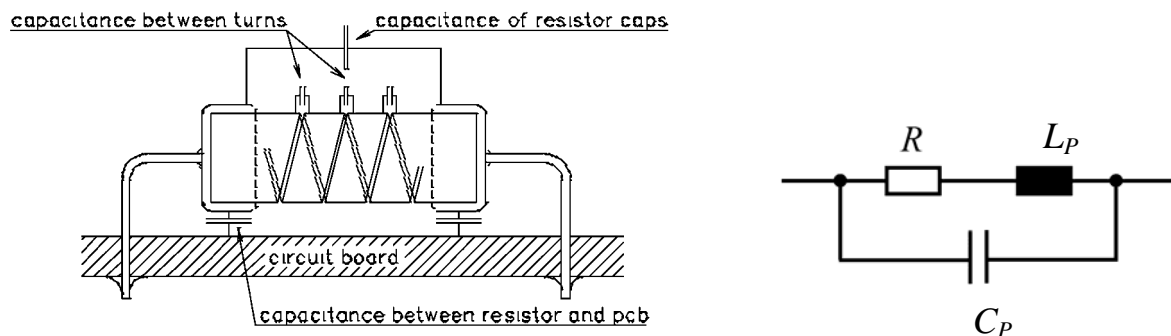
Najpogosteje uporabljeni velikosti SMD uporov sta 1206 (0,12" x 0,06", oziroma 3,2 x 1,6 mm) in 0805. Poznamo tudi manjše velikosti kot sta 0603 in 0402, ki se množičneje uporabljata v novejših aplikacijah. Nazivna moč upora dimenzije znaša 1/8 W ali 1/4 W. Poznamo tudi upor z "ničelno" vrednostjo, ki služi za premostitev vezi na tiskanini. Njegova upornost znaša dejansko nekaj deset mΩ.

SMD upore izdelujejo tudi v cilindrični obliki (slika ___), ki se v strokovni literaturi označuje s kratico MELF (metal electrode face bonding). Tudi tu sta priključni elektrodi prevlečeni s spojnim materialom-spojko.



Slika: MELF-upori

Nobena od predstavljenih izvedb ne zagotavlja idealnih lastnosti upora, saj je mikroskopsko gledano uporovna plast vedno oblikovana v obliki traku, ki je nameščen na omejenem prostoru v obliki zvitka (navitja). Impedanca upora zato ne vsebuje le realni-ohmski značaj temveč tudi imaginarni-induktivni (kapacitivni). Vzrok temu so prostorsko razmeščene induktivnosti in kapacitivnosti, ki ju prikažemo v nadomestnem vezju upora v obliki koncentriranega-parazitnega elementa L_P in C_P .



Slika: Nadomestno vezje upora

Specialni (uporovne verige,...)

