

Fakultet elektrotehnike i racunarstva
Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju

ELEKTROTEHNICKI MATERIJALI I TEHNOLOGIJA

koncept predavanja

Zagreb, 2004

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	4
1.1	Svojstva materijala.....	4
1.1.1	Opća fizikalna svojstva	4
1.1.2	Mehanička svojstva	4
1.1.3	Tehnološka svojstva	5
1.1.4	Električna svojstva	5
1.1.5	Magnetska svojstva.....	5
1.1.6	Termička svojstva	5
1.1.7	Kemijska svojstva	5
1.2	Ispitivanja.....	5
2.	SISTEMATIZACIJA MATERIJALA.....	6
3.	MATERIJALI ZA VODICE, VODICKE I POLUVODICKE ELEMENTE	8
3.1	Vodici za namote, vodove, kabele i spojne vodove.....	8
3.1.1	Grada materijala	8
3.1.2	Supravodljivost.....	10
3.1.3	Pregled materijala za izradu vodica za namote, kabele vodove i spojne vodove.....	11
3.1.3.1	Tehnički čisti metali:	11
3.1.3.2	Legure:	13
3.1.3.3	Složeni vodici	13
3.1.4	Oblici vodica.....	13
3.1.4.1	Žice, trake folije	13
3.1.4.2	Šuplji vodici za namote.....	13
3.1.4.3	Šipke i cijevi	13
3.1.4.4	Užad, pletenice.....	14
3.1.4.5	Složeni oblici.....	14
3.1.4.6	Optička vlakna.....	14
3.2	Vodljivi slojevi na nevodljivim podlogama	15
3.2.1	Vodljivi slojevi od čistih metala i legura.....	15
3.2.1.1	Debeli slojevi:	15
3.2.1.2	Tanki slojevi (filmovi).....	15
3.2.2	Vodljivi premazi na nevodljivim podlogama (paste, kitovi, boje, tinte, lakovi)	16
3.2.2.1	Smolni premazi.....	16
3.2.2.2	Keramčki premazi (paste)	16
4.	MATERIJALI ZA ELEKTRICNE KONTAKTE	16
4.1	Fizikalne osnove.....	17
4.2	Vrste kontakta	17
4.3	Materijali.....	18
4.3.1	Čisti metali:.....	18
4.3.2	Legure:	19
4.3.3	Sinterirani:	19
4.3.4	Impregnirani:	19
4.3.5	Platirani:	19
4.4	Klizni kontakti (četkice):.....	20
4.4.1	Sirovine.....	20
4.4.2	Grupe materijala	20
4.4.3	Fizikalne osobine.....	20
4.4.4	Radne osobine	20
4.4.5	Glavni zahtjevi	20
4.4.6	Vrste četkica.....	20
4.4.6.1	Amorfne (U) (Ugljene).....	21
4.4.6.2	Elektrografitne (EG).....	21
4.4.6.3	Grafitne (G i EGG)	21
4.4.6.4	Bakelitgrafitni (GB).....	21
4.4.6.5	Metalografitne (BG).....	21
4.4.6.6	Kolektori i koluti.....	21
5.	MATERIJALI ZA ELEKTRICNE OTPORNIKE	21
5.1	Žičani otpornici.....	22
5.1.1	Osnovni zahtjevi na materijal su:	22
5.1.2	Opci	22

5.1.3	Precizni	23
5.1.4	Žarni (elektrotermijski).....	23
5.2	Nežicani otpornici.....	24
5.2.1	Masivni.....	24
5.2.2	Slojni.....	24
6.	KONDENZATORI.....	25
6.1	Karakteristicne vrijednosti kondenzatora	25
6.2	Podjela kondenzatora	25
6.2.1	Stalni kondenzatori:	25
6.2.2	Promjenljivi kondenzatori	27
7.	MATERIJALI ZA TERMOBIMETALE	27
8.	MATERIJALI ZA TERMOELEMENTE	27
9.	RASTALNI OSIGURACI.....	28
10.	SPECIFICNE PRIMJENE POLUVODICKIH MATERIJALA.....	29
10.1	Otpornici s ovisnošću električnog otpora o nekom vanjskom faktoru.....	29
10.1.1	Naponsko ovisni otpornici (VDR, wilit, tirit, ocelit).....	29
10.1.2	Temperaturno ovisni otpornici (NTC, Termistori)	29
10.1.3	Fotootpori	29
10.1.4	Fotoelementi	30
10.2	Kristalni ispravljači	30

1. UVOD

Nauka koja govori o materijalima i postupcima prerade naziva se tehnologija.

Elektrotehnologija je poddisciplina tehnologije vezana uz elektrotehnicke materijale i proizvode.

Elektrotehnicki materijali su svi oni materijali koji ulaze u elektricne proizvode, a u užem smislu to su oni materijali, koji svojim svojstvima omogućuju optimalno djelovanje elektricnih i elektromagnetskih pojava.

Elektrotehnicki proizvodi su oni proizvodi koji svoj rad zasnivaju na iskorištenju elektricnih i elektromagnetskih pojava (pretvaranje mehanicke u elektricnu energiju i obrnuto, elektricne u toplinsku, prijenos signala i sl.)

Za neki proizvod potrebni su određeni materijali odnosno sirovina. Pri tome je pojam proizvoda odnosno sirovine relativan, a ovisi o fazama odnosno vrsti proizvodnje. Na primjer proizvodni niz za bakar: bakrena ruda - bakar - žica - izolirana žica - namot - elektricni stroj.

Cesto su elektricni proizvodi vrlo složeni i sastavljeni su od puno razlicitih materijala, kako po gradi tako i po svojim svojstvima.

Promatrano sa stanovišta elektrotehnike u elektrotehnickom proizvodu imamo dva suštinska dijela:

elektricki, koji provodi struju (na razlicite nacine, raznih velicina i frekvencija)

magnetski, koji provodi magnetski tok, te mora biti dobar magnetski vodiv.

Osim tih dijelova postoje i konstrukcijski dijelovi ciji je zadatak da aktivne dijelove povežu u kompaktnu cjelinu, a pri tome imaju i neke funkcije (osovina, hladenje, zaštita) vrlo bitne za rad proizvoda.

Svaki proizvod ne mora sadržavati obavezno i elektricki i magnetski krug, može samo elektricki (magnetski krug ne može postojati bez elektrickog)

Elektricki i magnetski krug moramo izradivati od materijala koji optimalno zadovoljavaju sve moguće kriterije, pri čemu je osnovni kriterij za pojedine proizvode razlicit.

Sa praktickog stanovišta postoje grupe kriterija:

1. Konstrukcijski kriteriji, za određeni proizvod to su :

svrsishodnost

elektricki i magnetski zahtjevi

mogućnost prerade

2. Kriteriji koji proizlaze iz vanjskih utjecaja ili utjecaja okoline. To su tehno klimatski kriteriji. Tehnoklima, jer je to klima koja djeluje na tehnicke proizvode.

Materijal moramo birati s obzirom na sve ove uvjete ali možemo, cesto ustvari moramo, ciniti i kompromise. Ako materijal zadovoljava sve ostale kriterije, a ne zadovoljava ovom zadnjem, onda ga zaštitimo od utjecaja klime. Na primjer kucište uređaja.

1.1 Svojstva materijala

Sliku o materijalu kao i njegovu tehnicu vrijednost određuju njegova svojstva. Koje od svojstava ce za primjenu biti od odlucujućeg znacjenja, a koja ce se svojstva moci u manjoj ili vecoj mjeri smatrati manje utjecajnim, ovisi o konkretnom slucaju. U svakom je medutim slucaju za izbor materijala potrebno poznavati neka njegova osnovna tehnicke važna svojstva. Ovima pripadaju:

1.1.1 Opća fizikalna svojstva

Gustoca (γ) je odnos mase i volumena materijala, koji se izražava u g/cm^3 , kg/dm^3 , t/m^3

Talište, podrucje taljenja, točka omekšanja, kapljište i stinište, mjereni u $^{\circ}\text{C}$ predstavljaju općenito granicu između krutog i tekućeg stanja materijala.

Vrelište, mjereno također u $^{\circ}\text{C}$ predstavlja granicu između tekućeg i plinovitog stanja.

Viskozitet, mjereno u stupnjevima Englera izražava se odnosom vremena isticanja ulja ili laka iz standardizirane posude i vremena isticanja iste količine vode.

Otpornost na vodu - higroskopnost (%)

1.1.2 Mehanicka svojstva

Cvrstoca na vlak, tlak, savijanje, torziju i t.d. predstavlja najveći teret u N koji neki komad materijala može podnijeti po jedinici presjeka (mm^2 , m^2) prije razaranja.

Granica popuštanja, je vlačno naprezanje svedeno na jedinicu površine prije naprezanja, kod kojega nastupa trajno istezanje materijala od 0,2%.

Istezanja ispod ove granice su elastična. Na primjer kod dubokog izvlačenja limova moraju sile biti takve, da prelaze granicu popuštanja, a da ne pređu prekidnu cvrstocu. Dopušteno naprezanje materijala u uređajima i aparatima smije iznositi samo jedan dio granice popuštanja (na pr. šestinu za metale; a desetinu za drvo). Krhki materijali nemaju granice popuštanja, već se kod određenog naprezanja lome bez prethodne trajne deformacije.

Modul elastičnosti je odnos naprezanja prema istezanju u elastičnom području. On daje naprezanje koje bi rezultiralo 100 %-tnim istezanjem. Što je veći modul elastičnosti, to je kruti materijal.

Prekidna dužina (dužina kidanja), mjerena u km, odgovara dužini, kod koje bi nit, žica, vrpca i sl., pukla uslijed naprezanja vlastitom težinom.

Otpornost na habanje je otpor prema trošenju površine uslijed trenja (struganja).

Tvrdoća je otpor krutog tijela prema prodiranju nekog tvrdog materijala. Već prema postupku određivanja razlikuje se tvrdoća po Brinell-u, Vickers-u, Rockwell-u i Mohs-u.

Žilavost je sposobnost materijala, da svoju kompaktnost izgubi tek nakon jaci promjena oblika. Mjere za žilavost su istezanje koje nastupa kod ispitivanja prekidne cvrstoce, savijanja kod određivanja cvrstoce na savijanje, kao i broj previjanja kod žica i limova, potreban da materijal pukne.

1.1.3 Tehnološka svojstva

Ova svojstva daju informaciju o njegovoj obradivosti. Najvažnija su:

Sposobnost deformiranja u hladnom i toplom stanju je sposobnost materijala da se može valjati, kovati, izvlaciti, savijati, duboko izvlaciti, previjati i tome slično.

Sposobnost struganja je mjerilo za obradivost materijala rucnim alatom i strojevima koji rade na principu skidanja strugotine.

Zavarljivost i lemljivost je sposobnost spajanja materijala varenjem i lemljenjem.

Sposobnost lijevanja, za koju kao mjera služi među ostalim skupljanje kod otvrdnjavanja te sposobnost ispunjavanja kalupa složenih oblika. Kao skupljanje označava se procentualno smanjenje dužine odljeva nakon otvrdnjavanja prema dužini kalupa.

1.1.4 Električna svojstva

Za vodljive materijale dolazi kao najvažnije svojstvo specifična električna vodljivost ($S\text{m}/\text{mm}^2$) i njena recipročna vrijednost, specifični električni otpor ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$), te temperaturni koeficijent otpora.

Za ostale materijale postoji cijeli niz električnih svojstava, o kojima će međutim, biti govora kasnije.

1.1.5 Magnetska svojstva

Ona karakteriziraju ponašanje nekog materijala u magnetskom polju. Obzirom na njihovu specifičnost, bit će ona iznesena u svezi sa razmatranjima magnetskih materijala.

1.1.6 Termička svojstva

Linearni koeficijent istezanja predstavlja prirast dužine sveden na jediničnu dužinu kod povišenja temperature materijala za 1°C ($\%/K$)

Toplinska vodljivost predstavlja sposobnost materijala za vodenje topline. ($W/m\ K$)

Specifična toplina predstavlja količinu topline potrebnu da se količina materijala jedinične težine povisi temperatura za $1\ K$ ($J/kg\ K$)

Toplina taljenja je količina topline potrebna da se masa od $1\ kg$ materijala prevedu iz krutog u tekuće stanje nakon što je dovedena do temperature taljenja (J/kg)

1.1.7 Kemijska svojstva

Kemijsko ponašanje materijala karakterizirano je njihovom sposobnosti otapanja u drugim materijalima i njihovim spajanjem sa drugim materijalima. Ovdje također dolazi i postojanost materijala pod djelovanjem različitih atmosferskih prilika.

1.2 Ispitivanja

Zadaca je ispitivanja da što točnije ustanove svojstva materijala, koja je potrebno poznavati bilo kod prerade bilo kod primjena. Ovo se međutim može postići samo ukoliko se točno poznaju i ako su točno određene različite okolnosti za utvrđivanje svojstava. Takvi su slučajevi na pr. kod utvrđivanja temeljnih kemijskih svojstava, općih fizikalnih svojstava materijala, električne vodljivosti metalnih vodica, temeljnih magnetskih karakteristika metala i sl. Postoji međutim niz drugih svojstava, koja pored ostaloga ovise i o načinu ispitivanja. Tako na pr. mehanička svojstva ovise o obliku uzorka, brzini porasta naprezanja kod

ispitivanja i t. sl. Narocito je teško definirati i dati zajednicki jezik za neka od praktickih svojstava materijala, kao na pr. sposobnost lijevanja, postojanost na koroziju, otpornost na habanje i tome sl. jer je teško naci metodu ispitivanja, koja bi bila univerzalna za sve materijale.

Opcenito se vrše tri vrste ispitivanja materijala.

U prvu grupu dolaze ispitivanja prema standardima. Ova su ispitivanja točno propisana i daju podatke o tome dali, i u kojoj mjeri materijal po vrijednosti odgovara kvaliteti koja se od njega očekuje. Ta ispitivanja također omogućuju usporedbu materijala, a također i zaključivanja na neke momente iz njegove povijesti, dakle postupka izrade, i t. d. Opcenito ona daju dobru opću sliku o materijalu.

U drugu grupu dolaze ispitivanja kojima je svrha da se dobije slika o nekom materijalu namijenjenom za rad u određenim prilikama. Ova ispitivanja mogu se bazirati na različitim ispitnim metodama, uključujući i metode standardnih ispitivanja. Obično se u ovom slučaju koriste metode prilagodene prilikama koje vladaju u pogonu, a režimom ispitivanja nastoji se cijeli postupak ustanovljavanja posljedica u razumnim granicama ubrzati. Ova ispitivanja iako još ne omogućuju neposredno prenošenje rezultata na sve praktičke slučajeve pogona, daju veoma korisne podatke i najčešće se primjenjuju kod osvajanja novih proizvoda i u drugim sličnim slučajevima. Potrebno je međutim dobro poznavanje općih svojstava materijala i dobro vladanje tehnikom ispitivanja.

I konačno, treću grupu čine ispitivanja ponašanja materijala u izgrađenim, gotovim proizvodima. Ova su ispitivanja veoma skupa i često dugotrajna, no najbolje omogućuju uvid u ponašanje materijala u konkretnom slučaju primjene. Također omogućuju prenošenje iskustava na druge slične slučajeve.

Koja ispitivanja i u kojem obimu će se izvršiti u pojedinim prilikama, ovisi također i o mnogo drugih faktora. Tako će na pr. proizvođač nekog materijala u svrhu kontrole svoga proizvoda vršiti obavezno sva standardna ispitivanja u veoma velikom broju, dok će kupac u pogledu standardnih ispitivanja vršiti redovito samo t.zv. "štih-probe", u opsegu koji ovisi o konkretnom slučaju.

Sa svrhom unificiranja zahtijeva na materijale kao uvođenje jednoobraznosti metoda i režima ispitivanja izrađuju se u svim tehnički razvijenijim zemljama standardi za materijale i njihovo ispitivanje. Ovim standardima nastoji se obuhvatiti sve materijale upotrebljavane u tehnici. U toku posljednjih godina učinjeno je i u našoj zemlji mnogo na području standardizacije, te se ide za sistematskim standardiziranjem materijala i ispitivanja po grupama.

Od inostranih standarda poznati su DIN (Deutsche Industrie - Normen), VDE (Verband deutscher Elektrotechniker), ASTM (American Society for testing materials), BS (British Standards), GOST (Gosudarstvenie standardi) i drugi.

Od međunarodnih standarda za područje elektrotehnike poznati su IEC (International Electrotechnical Commission) te ISO (International Standard Assotiation). Nastoji se da se nacionalni standardi usklade s međunarodnim standardima, kako bi i usporedba rezultata ispitivanja dobivenih u raznim zemljama bila lakša.

Kad se govori o ispitivanjima u praksi je isto tako važno i ispitivanje tržišta prije polaska u bilo kakav program izrade proizvoda, a i kasnije prilikom nabavke određenih materijala.

2. SISTEMATIZACIJA MATERIJALA

Vec je receno da se elektromagnetske pojave odvijaju u svim materijalima ali razlicito po vrsti i intenzitetu. Kroz sve materijale teče struja, kroz većinu teče elektronska struja ali kroz elektrolite teče ionska struja. Svi materijali vode magnetski tok, ali samo nekolicina ih ima veliku magnetsku vodljivost. U elektricne proizvode ugradujemo samo one materijale koji omogućuju da se te elektromagnetske pojave odvijaju optimalno po funkciju proizvoda, znaci za prijenos elektricne energije dobar vodič, a za vodenje magnetskog toka materijale s izraženom magnetskom vodljivošću. Zahtjevi koji se postavljaju na određeni materijal nisu uvijek isti. Isto svojstvo pojedinog materijala može nam u jednom slučaju koristiti a u drugom štetiti; na pr. elektromotorna sila prema bakru nam je u većini slučajeva nepoželjna pa želimo da je cim manja, ali termoelementi rade baš na toj osnovi pa nam je u tom slučaju korisna i želimo da je cim izraženija.

Svaki elektrotehnicki materijal ugrađen u elektrotehnicki proizvod ima svoju osnovnu funkciju (primarnu funkciju), ali pored te funkcije materijal mora odolijevati svim unutarnjim napreznjima i utjecajima nastalim zbog rada stroja (zagrijavanje, mehanicka napreznja itd.), te isto tako mora odolijevati i svim vanjskim utjecajima (utjecaj okoline odnosno klimatskim utjecajima). Osim toga materijal se mora moći oblikovati u potrebne oblike i međusobno sastavljati u skladnu cjelinu. Zato nam je potrebno poznavanje njegovih svojstava i njegovih tehnoloških sposobnosti.

Pri tome vrlo često u radu dolazi do isprepletanja funkcija.

Sistematizaciju elektrotehnickih materijala u našim daljnjim azgovorima cemo izvršiti po njihovoj primarnoj funkciji pa ih dijelimo na:

1. Materijale za vodice, vodicke i poluvodicke elemente
2. Materijale za izradu magnetskih krugova
3. Materijale za elektricnu izolaciju

Uz istu primarnu funkciju postoje znatne razlike u radu a samim tim i zahtjevima na materijal. Na raspolaganju nam stoje razni materijali po sastavu i porijeklu: cisti elementi, smjese, spojevi, zatim prirodni i umjetni materijali.

3. MATERIJALI ZA VODICE, VODICKE I POLUVODICKE ELEMENTE

Vodic u užem smislu je element strujnog kruga koji povezuje sve ostale elemente u tom krugu i jedini mu je zadatak da što bolje vodi struju.

Ako uz taj zadatak ima i neku drugu funkciju jednako važnu ili čak važniju za željenu svrhu od samog vodenja, ili ako se prilikom vodenja struje javljaju još neki specifični iskoristivi efekti onda govorimo o vodickom ili poluvodickom elementu u širem smislu, koji nosi specifične nazive (kontakti, otpornici ..). Pri tome imamo mnogo raznih primjena i raznih materijala i izvedbi. U najužu grupu vodica spadaju:

3.1 Vodici za namote, vodove, kabele i spojne vodove

Susrecemo ih u svakom električnom proizvodu i svuda gdje se prenosi električna energija. Rekli smo da su to elementi za transport energije, a prisutna je najveća šarolikost slučajeva i to:

- po vrsti struje (istosmjerna, izmjenična niskih i visokih frekvencija)
- po jakosti struje (od vrlo malih do vrlo velikih)
- po visini napona (od vrlo malih napona do vrlo velikih napona)
- po smještaju (unutar ili van električnog proizvoda)
- po ambijentu (različiti klimatski uvjeti)
- po dinamici rada (stalni ili povremeni rad)

Kad govorimo o vodicu kao elementu strujnog kruga, onda ga promatramo skupa s nosacima i izolacijama. Obzirom na gore navedeno imamo mnoštvo različitih vrsta i izvedbi, ali postoje zajednički zahtjevi:

- Primarni koji je uvijek prisutan: dobro vodenje struje
- Ostali su različito prisutni i raznog su karaktera - odolijevanje unutarnjim i vanjskim naprezanjima
- Tehnološke sposobnosti od kojih su narocito su važne:
 - sposobnost oblikovanja
 - podatnost u primjeni
 - dobro spajanje u električnom smislu
 - Ekonomičnost
 - Specifični zahtjevi

Pri odabiru materijala bit će u pravilu presudna vodljivost kao primarni zahtjev, pa se pitamo koji materijali dolaze u obzir.

Pri odabiru materijala moramo se prisjetiti grade materijala.

Amorfni materijali odlikuju se nepravilnim rasporedom atoma i atomskih grupa, a kristalinici materijali odlikuju se pravilnim rasporedom atoma odnosno molekula.

3.1.1 Grada materijala

Detaljno o gradi materijala učiti će se u fizici cvrstog stanja a sada samo neke natuknice.

Prisjetimo se Paulijevog principa da dva elektrona u atomu ne mogu biti u istom energetsom stanju, a to stanje je određeno kvantnim brojevima. Imamo četiri kvantna broja:

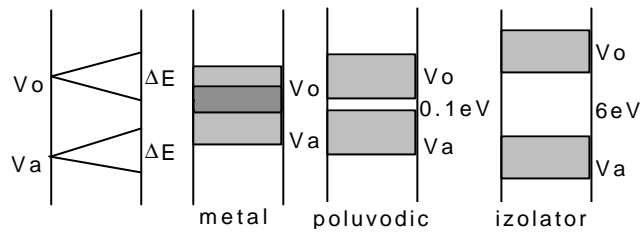
- n glavni kvantni broj 1(K); 2(L); 3(M); 4(N); 5(O); 6(P); 7(Q)
- l broj vrtnje od 0 do (n-1)
- m magnetski kvantni broj od (-l) do (l)
- s spin ($\pm 1/2$)

S ta četiri broja određeni su svi elektroni u atomu i ti nam brojevi ustvari određuju broj elektrona u pojedinoj ljusci atoma. U pravilu se ljuske pravilno popunjavaju od niže prema višoj, tablica 1.

tablica 1 Raspored elektrona po ljuskama

	K	L			M									
n	1	2			3									
l	0	0	1		0	1			2					
m	0	0	-1	0	1	0	-1	0	1	-2	-1	0	1	2
s	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
podljuska	2	2	6			2	6			10				
ljuska	2	8			18									

Elektroni posjeduju određeni kvant energije. Vanjski elektroni su važni za gradnju i ponašanje materijala. To su takozvani valentni elektroni. Na osnovu međusobnog načina vezivanja atomima imamo



slika 1 Energetski odnosi za razne materijale

ionsku vezu NaCl $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$

Na: 2, 8, 1 = 11 Cl: 2, 8, 7 = 17

kovalentnu Si_4

Si: 2, 8, 4 = 14 Ge: 2, 8, 18, 4 = 32

metalnu

Dok su u prve dvije veze valentni elektroni cvrsto vezani, metalna veza omogućuje stvaranje takozvanog elektronskog oblaka kao slobodnog nosioca elektricnog naboja. Materijali s takovom vezom su nam interesantni kao materijali za vodice. To su metali. Energetski odnosi vodljive i valentne trake vide se na slici 1.

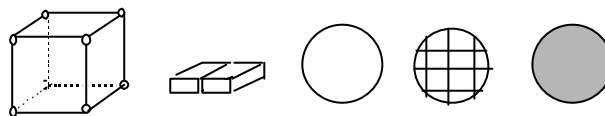
Jedno od najvažnijih svojstava materijala sa stanovišta elektrotehnike je otpor. Empirijska podjela materijala po specifičnom otporu je:

izolatori	$> 10^{12} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$
poluvodici	10 do $10^{12} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$
metali	$< 10 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$

Prema tome za vodice bi se upotrebljavali čisti metali, ali se zbog dva razloga odstupaju od toga pravila: tehnološki je nemoguće, odnosno veoma je skupo dobiti potpuno čisti metal

takav metal najčešće ne udovoljava ostale zahtjeve koji se postavljaju na njega (mehanicki, kemijska postojanost, toplinska svojstva, neekonomičnost)

Prilikom skrutnjavanja metala dolazi do kristalizacije, to jest stvaranja pravilnih oblika i odnosa koje atomi međusobno zauzimaju. Pod raznim uvjetima može doći do različite kristalizacije:



slika 2 Kristalna struktura

monokristal, sitna kristalna ili krupna kristalna struktura; slika 2. Unutar jednog kristala atomi su pravilno raspoređeni, a na granici zrna dolazi do deformacija. Kako se vodljivost metala bazira na putovanju slobodnih elektrona svaka deformacija u građi znači dodatnu prepreku tom putovanju. Receno je, da je vrlo složeno i skupo dobiti potpuno čisti metal, te u praksi dobivamo neciste metale. Svaka takova necistoca znači opet poremećaj u građi strukture, pri čemu ne djeluju sve necistoće jednako, neke imaju veći a neke manji utjecaj. Nadalje porastom temperature rastu i termička gibanja čestica što opet smanjuje slobodan put za gibanje elektrona. Prema tome

Specifična električna vodljivost metalnih materijala ovisi o:

vrsti metala (svaki metal ima svoju vodljivost)

čistoći (vrsti i količini primjesa)

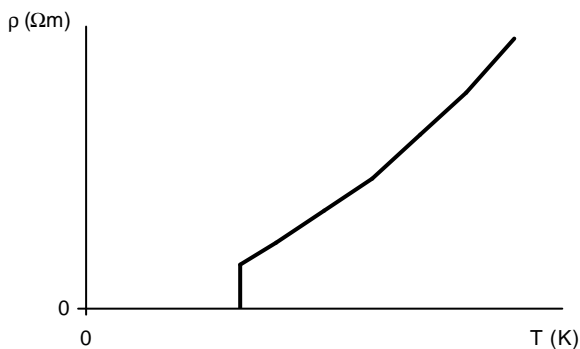
stanju strukture (monokristal kao kristal s najmanje deformacija ima najveću vodljivost, a metal sitnozrnat strukture ima najmanju vodljivost)

temperaturi (porastom temperature vodljivost pada)

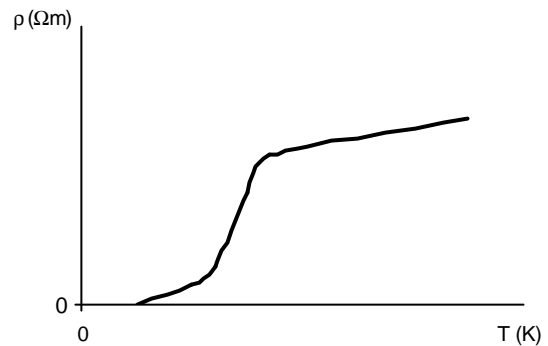
3.1.2 Supravodljivost

Pojava išezavanja elektricne otpornosti koja nastaje kao posljedica hladenja vodica do kritične temperature T_c naziva se supravodljivost. Pojavu je 1911. godine otkrio nizozemski fizičar Heike Kamerling - Onnes (1853 - 1926), kada je uspio u prstenu od žive, čiju je temperaturu održavao na nekoliko stupnjeva iznad apsolutne nule pomoću tekućeg helija, proizvesti struju koja je po isključenju izvora tekla još dvije godine. Problem praktične primjene supravodljivosti su vrlo niske temperature kod kojih materijal prelazi u supravodljivo stanje, za neke metale vrijednosti su navedene u tablici 2. Za tako niske temperature potreban je tekući helij čija je proizvodnja složena i skupa. Razvojem tehnologije otkriveni su novi materijali kod kojih do pojave supravodljivosti dolazi kod znatno viših temperatura, iznad 100 K, što omogućuje primjenu tekućeg dušika, čija je cijena i 100 puta jeftinija od tekućeg helija, što omogućuje intenzivni razvoj supravodica. Zanimljivo je da se među supravodicima ne nalaze metali koji su na običnoj temperaturi najbolji vodici. Supravodljivim tvarima na vrlo niskim temperaturama više ili manje naglo se mijenja karakter ovisnosti električnog otpora o temperaturi.

Oblik ovisnosti električne otpornosti o temperaturi supravodica tipa S1 dan je na slici 3 a tipa S2 na slici 4.

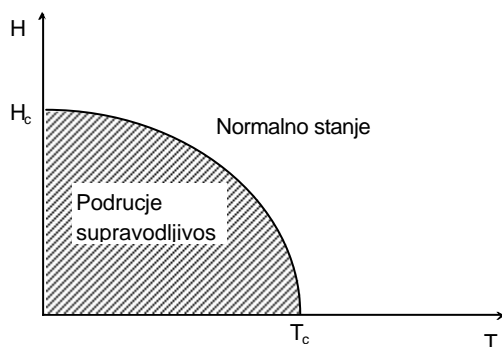


slika 3 Ovisnost električne otpornosti o temperaturi za supravodice tipa S1



slika 4 Ovisnost električne otpornosti o temperaturi za supravodice tipa S2

tablica 2 Neki supravodljivi materijali



slika 5 Područje supravodljivosti

materijal		T_c (K)	H_c (A/m)
aluminij	Al	1,196	$7,9 \cdot 10^3$
kadmij	Cd	0,56	$2,4 \cdot 10^3$
indij	In	3,407	$23,5 \cdot 10^3$
kositar	Sn	3,72	$24,5 \cdot 10^3$
niobij	Nb	9,25	$159 \cdot 10^3$
olovo	Pb	7,175	$64 \cdot 10^3$
tantal	Ta	4,48	$62 \cdot 10^3$
živa	Hg	4,2	$33 \cdot 10^3$
BaBi ₃		5,69	$59 \cdot 10^3$
Nb ₃ Sn		18,07	
Nb ₃ Ge		22,3	$> \cdot 10^7$

Kod čistih metala tip S1 prijelaz iz normalnog u supravodljivo stanje je vrlo strm ($\Delta T 10^{-3}$ K), a kod legura tip S2 nešto položeniji (ΔT nekoliko K).

Na stanje supravodljivosti može uticati i magnetsko polje koje snižava kritičnu temperaturu i to tim više što je polje jače. Kad se prekorači određena tzv. Kritična jakost polja (H_c) na nekoj temperaturi supravodljivost sasvim nestaje, i tvar postaje normalno vodljiva. Ta ovisnost temperature nestanka supravodljivosti o magnetskom polju određena je izrazom

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^2 \right] \quad \text{jed 1}$$

gdje je:

H_0 kritično magnetsko polje na apsolutnoj nuli temperature

T_0 kritična temperatura uz magnetsko polje $H_c = 0$

Na slici 5 dano je područje supravodljivosti, koje je ograničeno maksimalnom odnosno kritičnom temperaturom (T_c) i maksimalnim magnetskim poljem (H_c). Van toga područja materijal gubi svojstvo supravodljivosti koje je reverzibilna pojava.

Zbog ovisnosti supravodljivosti o magnetskom polju, jakost električne struje koja može teći supravodnicima ograničena je jakošću magnetskog polja koje ta struja stvara.

W: Meissner i R. Ochsenfeld pokazali su eksperimentalno 1933. godine da supravodnici, ako se najprije izloži magnetskom polju a onda ohladi na temperaturu ispod T_c istiskuje iz sebe magnetsko polje. Supravodnici tipa S1 na oštro određenoj vrijednosti jakosti polja H_c potpuno istisnu magnetsko polje, a kod supravodnika tipa S2 magnetsko polje se unutar prijelaznog područja može se djelomično održati u obliku pojedinačnih lokaliziranih i pravilno raspoređenih cijevi (niti), nosilaca magnetskog toka, koje su okružene supravodljivim područjem.

Primjena supravodljivosti se istražuje na raznim područjima, kao što su prijenos energije gdje su supravodljivi kabeli usporedivi (po cijeni) sa standardnim kabelima za snage iznad nekoliko gigavata, zatim u motorima i generatorima velikih snaga.

Prema tome ako možemo biramo: čiste odnosno tehnički čiste metale (bitna vrsta i količina primjese) Ako nas to ne zadovoljava biramo smjese dobivene legiranjem ili materijale dobivene metalurgijom praha (sinteriranje).

Složeni vodici sastavljeni po presjeku od dva ili više odvojenih materijala.

Osnovni koncept je: zadržati vodljivost, popraviti ostala svojstva (mehanicka, kemijska i toplinska)

3.1.3 Pregled materijala za izradu vodica za namote, kabele vodove i spojne vodove

Već smo rekli da će se za vodice u užem smislu upotrijebiti: čisti metal, smjese (legure) i složeni vodici. Sa stanovišta specifične vodljivosti materijali koji imaju visoku vodljivost, a to znači iznad 10^6 S/m (10 S m/mm²), tablica 3.

3.1.3.1 Tehnički čisti metali:

tablica 3 Specifične vodljivosti i specifične mase nekih metala

	specifična vodljivost (S m/mm ²)	specifična masa (kg/dm ³)
Srebro (Ag)	62	10,46
Bakar (Cu)	58	8,9
Zlato (Au)	45	19,3
Aluminij (Al)	38	2,7
Natrij (Na)	23	0,97
Željezo (Fe)	10,5	7,8

Tehnički čisto znači da idemo na vrlo veliku čistocu (99,9) i još pri tome moramo paziti na vrste primjese

Bakar:

Razlog

mali otpor, velika vodljivost, čistoca 99,9 %
dovoljna mehanicka svojstva

otpornost na koroziju - opasnost visokih temperatura
 dobra obradivost - osim lijevanja
 dobra lemljivost

Dobivanje:

žarenje rude - koncentrat rude
 redukcija ugljika - bakreni kamen
 prerada bakrenog kamena - sirovi bakar
 rafinacija sirovog bakra - rafinirani bakar
 elektroliza rafiniranog bakra - elektrolitski ili katodni

Svojstva:

crvene boje, specifična masa $8,9 \text{ kg/dm}^3$; atomska težina 63,57; redni broj 29; temperaturni koeficijent istežanja $17 \cdot 10^{-6}/\text{K}$; talište $1083 \text{ }^\circ\text{C}$; vrelište $2300 \text{ }^\circ\text{C}$; toplinska vodljivost 893 W/K.m ; toplina taljenja $211,5 \text{ kWs/kg}$; temperaturni koeficijent otpora $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}/\text{K}$

Utjecaj primjesa:

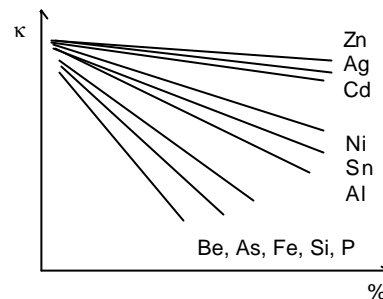
Zn, Cd, Ag imaju mali utjecaj na specifičnu vodljivost
 Ni, Sn, Al imaju srednji utjecaj na specifičnu vodljivost
 Be, As, Fe, Si, P imaju veliki utjecaj na specifičnu vodljivost

Bakar bez kisika; lijevanje bez dna "OFHC"

Obrada u krajnje oblike; izvlačenje: vruće pa hladno

Stanja:

Ekstra meki	E Cu F20	57	40%
Meki	E Cu F25		
Polutvrđi	E Cu F30		
Tvrđi	E Cu F37		
Ekstra tvrđi	E Cu F45	56	2%



slika 6 Utjecaj primjesa na Cu

Aluminij:

Razlog:

dosta mali otpor
 mala specifična težina (najvažniji laki metal specifične težine ispod 5 kg/dm^3)
 dobra kemijska postojanost
 dobra obradivost
 specifična svojstva (mogućnost lakog oksidiranja, otpornost na električni luk)

Dobivanje:

nema ga elementarnog u prirodi (poznat od 1823)
 iz boksita
 dobivanje čiste glinice
 elektroliza

Svojstva:

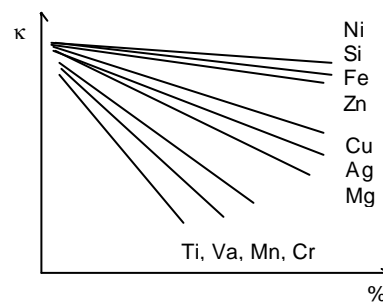
srebrno bijele boje; specifična masa $2,7 \text{ kg/dm}^3$; atomska težina 26,98; redni broj 13; temperaturni koeficijent istežanja $24 \cdot 10^{-6}/\text{K}$; talište $658 \text{ }^\circ\text{C}$; vrelište $2270 \text{ }^\circ\text{C}$; toplinska vodljivost $209,3 \text{ W/K.m}$; toplina taljenja 396 kWs/kg ; temperaturni koeficijent otpora $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}/\text{K}$

Utjecaj primjesa:

Ni, Si, Fe, Zn imaju mali utjecaj na specifičnu vodljivost
 Cu, Ag, Mg imaju srednji utjecaj na specifičnu vodljivost
 Ti, Va, Mn, Cr imaju veliki utjecaj na specifičnu vodljivost

Stanja:

meki	E Al F7	36	40%
polutvrđi	E Al F9		
tvrđi	E Al F13		
ekstra tvrđi	E Al F17	35	2%



slika 7 Utjecaj primjesa na Al

Natrij

Razlog:

jeftin
 veoma lagan

Svojstva:

srebrno bijele boje, lako zapaljiv; specifična masa 0.97 kg/dm^3 ; atomska težina 22.98; redni broj 11; temperaturni koeficijent istezanja $71.10^{-6}/\text{K}$; talište $98 \text{ }^\circ\text{C}$; vrelište $881 \text{ }^\circ\text{C}$; toplinska vodljivost 138.1 W/K.m ; toplina taljenja (2.6 kJ/mol) $\times \times \text{ kWs/kg}$; temperaturni koeficijent otpora $\alpha = 6.7 \cdot 10^{-3}/\text{K}$
Polietilenske cijevi - spriječiti kontakt sa zrakom

Zamjena bakra alumnijem:

- zracni vod
- kabel
- namot

3.1.3.2 Legure:

Nikada se legure ne upotrebljavaju zbog poboljšanja vodljivosti, jer ona obavezno pada, nego zbog nekih drugih razloga. Najčešće se upotrebljavaju legure na bazi:

Bakra (Cu)

- Kadmij (Cd), u malim količinama - povećana otpornost na habanje
- Srebro (Ag), povišena temperatura rekristalizacije i otpornost na habanje
- Kositar (Sn), *razne konstrukcijske bronce*
- Fosfor (P) i berilij (Be), odlična mehanicka svojstva
- Cink (Zn), dobije se širok izbor raznih legura pod nazivom mjedi

Aluminija (Al)

- Silicij (Si) silumin, lijevanje, mali kavezni motori
- Silicij (Si) i magnezij (Mg), legura pod nazivom aldrej odličnih mehanickih svojstava za zracne vodove (specifična masa 2.7 kg/dm^3 , specifična vodljivost 31 Sm/mm^2 , zatezna cvrstoca 350 N/mm^2)

Željeza (Fe), ugljik (C), celici samo u iznimnim slucajevima zbog niske vodljivosti

Specijalne legure

- Za supravodice NbZr, NbTi, N_3Sn

3.1.3.3 Složeni vodici

- kombinacija čistih metala (Fe, Cu)
- čisti metali + legure (Al, Ce)





3.1.4 Oblici vodica

Postoji niz vrsta vodica, koji se razlikuju po obliku, presjeku, načinu izoliranja, a sve prvenstveno ovisi o primjeni, te su oblici diktirani sa:

- prikladnošću napajanja
- tehnološkim sposobnostima
- specijalnim zahtjevima

3.1.4.1 Žice, trake folije




sposobnost namatanja, različiti oblici, beskonacna duljina

-  okrugli promjera do 3 mm
materijali Cu i legure Cu; Al i legure Al; celik i Ag samo iznimno
-  profilni presjeka do 100 mm^2
materijali Cu i legure Cu; Al i legure Al
-  plosnati debljine 0.2 do 3 mm
materijali Cu, Al
-  folije debljine 0.04 do 0.2 mm
materijali Cu, Al, Au, Ag, legure Cu

Izrađuju se valjanjem i izvlačenjem





Upotreba: namoti, zracni vodovi, kabeli, spojni vodovi, tiskane pločice, elektrode kondenzatora

3.1.4.2 Šuplji vodici za namote

-  pravokutni sa zaobljenim rubovima, šupljine služe za dodatno hlađenje
materijal obavezno Cu
-  Izrađuju se valjanjem i izvlačenjem
-  Upotreba: namoti velikih snaga

3.1.4.3 Šipke i cijevi

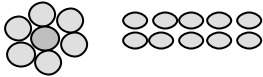
raznih oblika i presjeka

-  okrugli presjeka $>100 \text{ mm}^2$
materijali Cu i legure Cu; Al i legure Al
-  pravokutni presjeka $>100 \text{ mm}^2$
materijali Cu i legure Cu; Al i legure Al
-  višekutni $S > 100 \text{ mm}^2$
materijali Cu i legure Cu; Al i legure Al
-  cijevi
materijali Cu i legure Cu; Al i legure Al

Izrađuju se valjanjem i izvlačenjem

Upotreba za: spojne vodove, za vodljive elemente, krute valovode

3.1.4.4 Užad, pletenice

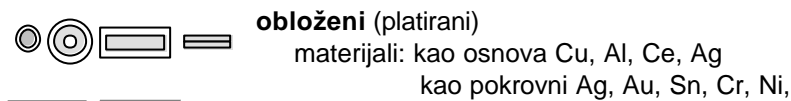


užad jedan ili više površina raznih materijala, pletenice obično jedan materijal, materijali jednakih ili različitih presjeka, veoma savitljivi.

Izrađuju se valjanjem i izvlačenjem, te nakon toga upređanjem

Upotreba za: spojne vodove, zračne vodove, kabele

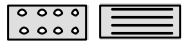
3.1.4.5 Složeni oblici



obloženi (platirani)

materijali: kao osnova Cu, Al, Ce, Ag

kao pokrovni Ag, Au, Sn, Cr, Ni,



matricni supravodice

materijali: kao osnova Cu

kao vodljiva komponenta NbZr, NbTi, Nb₃Sn

služe za: spojne vodove, zračne vodove, krute valovode, vodicke elemente

Izrađuju se na dva osnovna načina:

Metalurški - na taj način dobiju se deblji slojevi:

metalurški, šipka, cijev

ljevacki, oblikovanje trupaca

valjanje, ploca na ploca

Kemijski - na taj način dobiju se tanji slojevi

cisto kemijski, taloženje ili uranjanje (bez struje) u otopini koja sadrži metal

elektrolitski, nanošenje elektrolizom

Svrha:

povećanje električne vodljivosti (Cu oko Fe)

poboljšanje kontakta (pozлата)

poboljšanje kemijske otpornosti (pozлата, niklanje)

poboljšanje lemljivosti (kositar (Sn) na Cu)

dekoracija

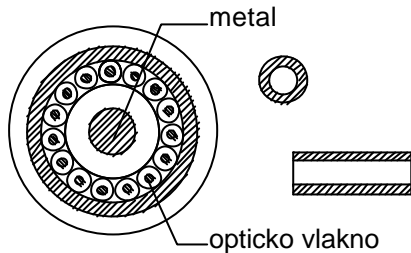
Upotreba: spojni vodovi, zračni vodovi, kruti valovodi, vodljivi elementi, supravodici

Vodice treba izolirati i to se vrši na različite načine: lak, papir, umjetna smola, guma, kombinacije raznih materijala što ovisi o uvjetima u kojima vodici radi, ali o izolacijskim materijalima će biti govora kasnije

3.1.4.6 Optička vlakna

To su posebni oblici složenih vodica, gdje aktivnu funkciju vodica preuzima staklo ili prozirna plastika koje je po svojim svojstvima izolacijski materijal. Signal se prenosi kao svjetlost vodena totalnom refleksijom. Nosilac je visokofrekventni signal frekvencije 10^{13} do 10^{15} Hz. Vidimo da se radi o vrlo visokim frekvencijama. Za sada je najčešća upotreba u komunikacijama, ali se područje upotrebe naglo širi i na ostala područja.

Oko aktivne niti, koja je od prozirnog stakla, najčešće silicijsko staklo vrlo velike čistoće i precizne izrade, nalazi se plastični omotac za zaštitu od kemijskih i mehaničkih oštećenja, te za sprječavanje preslušavanja s ostalim valovodima. Vrlo često je u sredini metalna žica kao nosilac mehaničkih svojstava.



slika 8 Shema optickog kabela

Prednost: nema interferencije s drugim sustavima,
visokofrekventni signali manji su gubici
moguc mali polumjer savijanja
podnosi visoke temperature
otporni na koroziju
mala težina

Nedostaci:

osjetljivost na ionizacijska zracenja
relativno visoka cijena izrade odredena ekstremnom cistocom materijala i tocnoscu izrade dimenzija
medusobno spajanje staklenih vodica kao i spajanje vodica s modulatorima

Primjena

telekomunikacije, televizija, racunarstvo, industrijska automatika, zemaljske satelitske stanice, vojna primjena

3.2 Vodljivi slojevi na nevodljivim podlogama

U užu grupu vodica, ali s proširenim mogućnostima isto tako spadaju i vodljivi slojevi na nevodljivim podlogama. Služe kao spojni vodovi, ali se mogu upotrijebiti i kao drugi vodicki elementi. Nastali su kao posljedica potrebe da se vodenje struje (razlicitim oblicima žicanih vodica za mnoge svrhe) riješi prikladnije. U toj grupi postoje:

vodljivi slojevi od čistih metala
vodljivi premazi

3.2.1 Vodljivi slojevi od čistih metala i legura

U osnovi to je na vodljivu podlogu nanesen metal, ali tako da ne bude obuhvacena cijela površina nego samo određeni dio. Za to postoje dva osnovna nacina

nanošenje folije
nanošenje metala u prahu (rastaljenog metala, ili kemijsko)

Prema debljini metalnog sloja imamo dvije grupe

3.2.1.1 Debeli slojevi:

debljine preko 5μ , koji se nanose

1. Lijepljenjem metalne folije na izolacijsku podlogu
 - a) pločica na pločicu pomocu ljepila - vrući postupak
 - b) izrezani oblik na pločicu pomocu ljepila - vrući postupak
2. Reljefno uprešavanje hladni postupak
upotrebljava se za neravne površine, bakar se nanosi pomocu "žiga" koji je od gume
3. Sinteriranje praha na podlogu
4. Štrcanje rastaljenog metala na podlogu, obicno kroz masku
5. Elektrolitski postupak

semi elektrolitski: najprije se površina kemijski platira (neelektrolitski prevuce metalnim slojem male debljine), a zatim se dio površine prevlaci elektrolitski do konacne debljine. Prvo se na površinu nanese vodljivi premaz lak, tinta ili boja zatim elektrolitski metal.

potpuno kemijski: željeni dio se neelektrolitski platira, a zatim uranja u otopinu

Metali:

kao za prevlake na metale

Cu, Ni, Au, Ag, Sn, Sn/PB, Sn/Ni, Rh

Podloga:

plastika, guma, staklo, poluvodic

3.2.1.2 Tanki slojevi (filmovi)

debljine ispod 5μ , koji se nanose

1. Kemijskim obaranjem na vruću podlogu

kemijske reakcije metalne prašine na površinu vruće podloge

2. Tehnologija naparavanja u vakuumu

vrući materijal na hladnu podlogu, metal se grije u vakuumu isparava i kondenzira se na hladnu podlogu. Ovisno o vrsti grijanja izvora

- a) otporno grijanje: žica od volframa (W) u kontaktu s metalom koji isparava
- b) fleš: metalni prah na grijanoj podlozi, isparava se
- c) elektronski mlaz: grijanje metala elektronskim mlazom koji rastapa metal, te on opet isparava

3. Prskanje (ionizacija)

hladna tehnologija, svodi se na bombardiranje metala ionima. Ionizirani argon (plemeniti plin) bombardira VN katodu (metal) i izbija atome koji se talože na podlogu koja je na negativnom potencijalu

Metali:

Ag, Cu, Au, Al, Ta, Cr/Ni, Cr, Mo, Pt

3.2.2 Vodljivi premazi na nevodljivim podlogama (paste, kitovi, boje, tinte, lakovi)

Tu su smjese metala i nekog nemetalnog materijala, koje se nanose na nevodljivu podlogu. Po sastavu dijelimo ih u dvije grupe

3.2.2.1 Smolni premazi

metalni prah (punilo) + tekuća umjetna masa + (otapalo); nanošenje a zatim pečenje (100 - 200 °C)

Metali:

Ag, Cu, C (grafit nije metal), Au, Pt, Paladij, Rutenij

Umjetne mase

uglavnom epoksidne smole u obliku: paste, boje, tinte, lakova, kitova

3.2.2.2 Keramički premazi (paste)

metalni prah + stakleni ili keramički prah s dodatkom umjetne mase i eventualno otapala nanošenje, sušenje, paljenje (300 - 1000 °C) Ostaje metal u staklenoj masi a smola koja je služila kao tehnološka komponenta izgori.

Metali:

Ag, Cu, C (grafit nije metal), Au, Pt, Paladij, Rutenij

Umjetne mase:

najčešće epoksidne smole u obliku paste

Nanošenje:

licenje (premazivanje), štrcanje, uranjanje, sitotisk

Ovisno o vrsti umjetne mase i gustoće smjese

Upotreba: sve veća

elektrostatska zaštita (tinjanje visokonaponski vodljivi i poluvodljivi lakovi)

spajanje, popravci vodljivih površina

priključak izvoda

vodljivo lijepljenje

elektrode

kontaktna površina

površine za elektrolitsko platiniranje

razne vodljive i otporne petlje

uzemljene površine

lemne površine

4. MATERIJALI ZA ELEKTRICNE KONTAKTE

Elektricni kontakti su elementi sklopnih uređaja, koji služe za uključivanje i isključivanje strujnih krugova. Oni drugim riječima omogućuju da se odijeljeni dijelovi strujnog kruga međusobno privremeno ili trajno povezuju i odjeljuju te time omogućuju da struja u strujnom krugu teče ili ne teče. Pri tome otvoreni kontakt mora besprijekorno odvajati, a zatvoreni besprijekorno voditi struju. Mora biti pouzdan i omogućiti da se to čini mnogo puta. Kada je kontakt otvoren na njemu je cijeli napon, a kada je zatvoren na njemu je samo pad napona (poželjno čim manji). Zahtjevi se jednom postavljaju na materijal, da po svojim svojstvima zadovoljava, te na konstrukciju (mehanizam koji to mora omogućiti). Zahtjevi su raznog karaktera: električni, mehanicki, toplinski, kemijski, specifični a ovisi o uvjetima u kojima radi kontakt:

razna strujna opterećenja

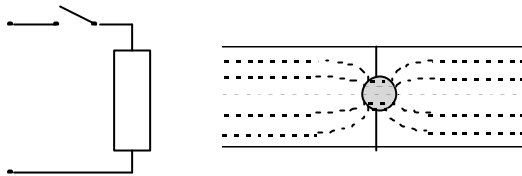
razne izvedbe

razni načini rada

4.1 Fizikalne osnove

Bez obzira kako pažljivo izveli kontakt nikada nije cijela kontaktna površina u dodiru, nego je dodir samo u nekoliko tocaka. Prilikom ukljucivanja, pod pritiskom, dolazi do plasticne deformacije, kontaktna ploha raste, smanjuje se otpor kontakta. Zahvaljujuci nesavršenosti kontakta dolazi do dodatnog pada napona na kontaktu a time i do mjestimicnog zagrijavanja kontakta. Taj dodatni otpor nazivamo prijelazni otpor odnosno kontaktni otpor. Radi lakšeg razumijevanja dogadanja na kontaktu kontaktni otpor možemo podijeliti na dva dijela

provlačni otpor R_p
slojni otpor R_s



slika 9 Shema kontakta

$$R_K = R_p + R_s$$

$$R_p = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} = \frac{\rho}{2a}$$

$$R_s = \sigma \frac{H}{F} = \frac{\sigma}{\pi a^2}$$

$$R_K = R_p + R_s = \frac{\rho}{2a} + \frac{\sigma}{\pi a^2}$$

ρ = specifični otpor [$\Omega \cdot m$]

σ = specifični slojni otpor [$\Omega \cdot m^2$]

F = kontaktni pritisak [N]

H = tvrdoća materijala [N/m^2]

a = polumjer dodirne površine [m]

Kod slabih pritisaka (male struje) prevladava slojni otpor R_s , a kod velikih (jake struje) prevladava provlačni otpor R_p

Bez obzira na specifičnosti uvijek će se u manjoj ili većoj mjeri od materijala tražiti:

dobra električna vodljivost

mali prelazni otpor na dodirnom mjestu

dobra toplinska vodljivost

mehanička otpornost

kemijska otpornost

toplinska otpornost

u vezi s tim:

zavarivanje materijala

prenošenje materijala

Zastupljenost intenziteta navedenih zahtjeva ovisi o vrsti i izvedbi, te načinu rada, odnosno o mehaničkom režimu rada koji čine:

brzina uklapanja

učestalost uklapanja

pritisak između lamela kontakta

trajanje rada kontakta pod opterećenjem

te električkom režimu rada koji čine:

vrsta i veličina struje

visina napona

snaga ukapcanja

karakter strujnog kruga

4.2 Vrste kontakta

A) Kontakti koji otvaraju i zatvaraju strujne krugove u pravilu bez električnog opterećenja a dijele se na: utične i spojnice (vijčani)

B) Kontakti koji otvaraju i zatvaraju strujne krugove pod električnim opterećenjem, a dijele se na razne načine:

a) po izvedbi:

tlacni, klizni, kotrljajući

b) po intenzitetu opterećenja na kontakte za:

mala opterećenja (bez luka, mali pritisci)

srednja opterećenja (do 20 A i 600 V, moguć luk, trošenje)

velika opterećenja (>20 A, veliki pritisci, obavezan luk), ponekad rade u ulju ili vakuum

c) po nazivnom naponu:

niskonaponski ($U_n < 1 \text{ kV} \sim \text{odnosno } 1.2 \text{ kV} =$)

visokonaponski ($U_n > 1 \text{ kV} \sim \text{odnosno } 1.2 \text{ kV} =$)

srednje visoki (3 do 35 kV)

visoki (35 do 400 kV)

vrlo visoki 400 kV

d) po mjestu primjene:

kucne instalacije

razvodne mreže

industrija

vuca

rudnici

e) po namjeni:

rastavljacii otvaranje u praznom hodu razmak

sklopke prekidaju normalni pogon

prekidaci kratkotrajno struje kratkog spoja

pokretaci pokretanje motora ograničenje struje

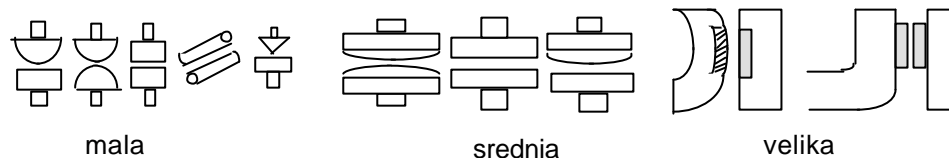
regulatori drži određenu veličinu

osiguraci prekidaju kod određenih veličina

odvodnici prenapona

releji mjere neku te veličinu automatski ukapcaju ili iskapcaju, mogu biti automatski i neautomatski

f) po obliku



slika 10 Razni oblici kontakata

4.3 Materijali

Pri izboru materijala polazimo od visoke vodljivosti, znači da će nas u osnovi interesirati metalni materijali ali za neke svrhe postoje vrlo složeni zahtjevi, pa izbor nije jednostavan, a vršimo ga na osnovu: pogonskih uvjeta a to su

vrsta, funkcija, vrsta opterećenja, okolina, primjena tehničkih zahtjeva

električki, termički, mehanički, kemijski, tehnološki fizikalnih svojstava

električna vodljivost, toplinska svojstva, tvrdoća, svojstva mikrosloja, rekuperacija

Najjednostavnije je kod utičnih kontakata, koji ukapcaju bez struje. Znatno složenije je kod tlačnih i kliznih kontakata kod kojih svaka vrsta opterećenja nosi svoje probleme

od minimalnih do maksimalnih električnih naprezanja

od minimalnih do maksimalnih mehaničkih naprezanja

od minimalnih do maksimalnih toplinskih naprezanja

U pravilu se metali upotrebljavaju za utične, stezne i tlačne kontakte, a nemetali ili smjese metal - nemetal za klizne

Metalni:

cisti metali (dosta rijetko, jer cisti metal gotovo ni za jedan kontakt nema sva svojstva)

legure (veoma mnogo, jer legiranjem možemo u velikoj mjeri korigirati potrebna svojstva)

sinterirani (veoma mnogo, razlozi slični kao i kod legiranih)

obloženi (platinirani) (veoma mnogo, postoje velike mogućnosti kombiniranja)

4.3.1 Cisti metali:

Kod čistih metala imamo tri grupe metala određene na osnovu:

velike vodljivosti: Cu, Ag

kemijske otpornosti: Rh, Pd, Ir, Pt, Au
 visoke toplinske postojanosti i cvrstoce: W, Mo
 Bakar (Cu) (tvrđi): cisti, sklon oksidiranju, za visoke napone ili konstrukcije koje osiguravaju čišćenje kontaktnih površina

Srebro (Ag): najčešći, najveća vodljivost električna i toplinska ne oksidira, ali je osjetljiv na sumpor, stvaraju se sulfidi koji smetaju kod malih pritisaka, upotreba u raznim oblicima, mehanicki je mekan

Zlato (Au): jedan od najplemenitijih metala, nema površinskih slojeva, samo za prevlake jer je mekan i skup

Platina (Pt): ne stvara slojeve, kemijski otporna, visoko talište, dobro platiniranje, skupa

Paladij (Pd): slabiji od Pt, bolji od Ag, jeftiniji od Rh

Rodij (Rh) - plemenit, tvrd, prevlake

Iridij (Ir): tvrd, kemijski otporan, visoko talište, galvanske prevlake

Volfram (W): visoko talište, tvrd, otporan na habanje, Sinteriranje

Molibden (Mo) lakše se obrađuje od volframa, a sličnih je svojstava

Ugljik (C): ispariv oksid, ostaje čista kontaktna površina

4.3.2 Legure:

Na bazi

Bakra Cu (Be, Cd)

Cu/Be mehanicki odlican

Cu/Cr

Cu/Ni

Cu/Cd otpornost na mehanicka opterećenja i zavarivanje

Srebra Ag (Cu, Cd, Pd, Au)

Ag/Cu Cu povećava cvrstocu, smanjuje otpor na koroziju

Ag/Cd mehanicko poboljšanje, otpornost na zavarivanje

Ag/Au još veća kemijska stabilnost

Ag/Pd smanjuje utjecaj sumpora (30-60%)

Platine Pt (Ir)

Pt/Ir kemijska otpornost, mehanicki odlican

4.3.3 Sinterirani:

Na bazi

Srebra Ag (C, CdO, Ni, W, Mo)

Ag/C(grafit) 2 do 5% za tlačne kontakte, otporni na zavarivanje

Ag/CdO 3 do 10% bolja mehanicka i toplinska svojstva

Ag/Ni 20 do 50% zavarivanje, toplinska postojanost

Ag/W 30 do 50% toplinska otpornost, otpornost na luk

Ag/Mo toplinska otpornost, otpornost na luk

Bakra Cu (W, C)

Cu/W toplinska postojanost (do 80%W)

Cu/Mo toplinska postojanost

Volframa (W)

W/Ni 2% bolje oblikovanje

4.3.4 Impregnirani:

Wo/Ag: 40% Ag tvrdoca, vodljivost

4.3.5 Platirani:

Kao osnovni materijal upotrebljava se:

Cu, Ms, Bz, Ag

Kao materijal za oblaganje:

Ag, Au, Pt, Pd, Rh, Ir, Pt/Ir

To oblaganje može biti veoma tanko (galvanski) ili deblje, prikladno nanosena pločica

4.4 Klizni kontakti (cetkice):

Komutacija, potrošnja, mehanicka cvrstoca, samopodmazivanje, trenje sve su to elementi o kojima moramo voditi racuna pri izboru materijala.

Komutacija je

spособnost cetkice da pod teškim električkim i mehaničkim uvjetima osigura prijenos struje bez iskrenja uz minimalnu potrošnju kliznog kontakta

aktivni plinovi - soli - slabe komutaciju, uvjetuju porast temperature što izaziva smanjenje otpora

Patina je

a) oksidna metalna prevlaka (bez korozivnih plinova) tijesno povezana s metalom koji se nalazi pod njom "metalna patina" debljine do 0.02μ

crveni oksidul Cu_2O

crni oksid CuO

b) fine cestice ugljika patina koja sadrži ugljik, mijenja boju patine - intenzitet crnila prelazni sloj - ugljik u oksidu cija debljina ovisi o struji

4.4.1 Sirovine

1. PETROKOKS - grafitibilna svojstva, mali μ i mali prelazni otpor
2. ŽARENA ČAĐA - relativno veliki ρ , mala kolicina pepela
3. SMOLNI KOKS -

4.4.2 Grupe materijala

- A. Amorfni (U)
- B. Elektrografitni (EG) grafitizacija iznad 2500°C
- C. Grafitni (G i EGG)
- D. Bakelitgrafitni (GB)
- E. Metalografitni (BG)

4.4.3 Fizikalne osobine

- a Prividna specificna masa i porozitet
- b Tvrdoca
- c Specificni električni opor
- d Cvrstoca na savijanje
- e Kolicina pepela

4.4.4 Radne osobine

- A) Pad napona
- B) Koeficijent trenja
- C) Potrošnja cetkice

4.4.5 Glavni zahtjevi

- I. Dobra sposobnost komutacije
- II. Mala potrošnja cetkice i kolektora
- III. Mali ukupni gubici
- IV. Velika električna i termička opteretivost
- V. Velika mehanička cvrstoca
- VI. Velika sposobnost podopterećenja
- VII. Jednolika raspodjela struje

Utjecaj brzine na potrošnju $H = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot v^2$ (mm/100 sati)

H = brzina potrošnje

Temperatura znacajno utice iznad 100 °C

Vlažnost zraka >0.4 g/m³

4.4.6 Vrste cetkica

Ugljik svojim svojstvima najbolje zadovoljava tim zahtjevima, pa su cetkice i napravljene na bazi ugljika i to kao:

4.4.6.1 Amorfne (U) (Ugljene)

žarena cada + petrokoks

mljevenje, sijanje, miješanje s vezivom → prešanje → zagrijavanje do 1373 K (1100 °C)
tvrdi, prelazni pad napona 1.50 - 1.75 V, $\mu = 0.2 - 0.3$, manja brzina $v \leq 20$ (15 - 20) m/s,
gustoca struje $G < 6$ (4 - 6) A/cm² ($\rho = 18-60 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

4.4.6.2 Elektrografitne (EG)

žarena cada + petrokoks

kao amorfne + zagrijavanje bez prisutnosti zraka > 2773 K (2500 °C)
mekše, prelazni pad napona 1.3 - 1.5 V, $\mu = 0.1 - 0.2$, brzina $v < 60$ m/s, gustoca struje $G < 12$ A/cm²
Grafitacija izvršena na umjetan način iz plemenitog ugljena. Svojstva im variraju od ugljenih do grafitnih,
već prema stupnju grafitizacije. Te cetkice imaju najširu primjenu i najviše se nalaze u upotrebi.

4.4.6.3 Grafitne (G i EGG)

grafit + elektrografit

mljevenje, miješanje s dodacima te aglomeriranje, zagrijavanje do 1573 K (1300 °C)
mekane, elasticne, prelazni pad napona 1 - 1.25 V, $\mu = 0.1 - 0.15$, veće brzine $v < 75$ (20 - 40) m/s
gustoca struje $G = 10 - 12$ A/cm² ($\rho = 10 - 40 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

4.4.6.4 Bakelitgrafitni (GB)

grafit + elektrografit

aglomeriranje pomoću fenolformaldehidnih smola, zagrijavanje do 453 K (180 °C)
mehanicki tvrde, veliki ρ prelazni pad napona 1.1 - 1.6 V, $\mu = 0.12 - 0.15$, $v < 40$ m/s
gustoca struje $G < 8$ A/cm²

4.4.6.5 Metalografitne (BG)

metalna prašina (Cu, Ag, Bz) + prirodni grafit + vezivo

miješanje, vezivo fenolformaldehidna smola zagrijavanje do 453 K (180 °C)
teške, prelazni pad napona 0.1 - 0.5 V, $\mu = 0.1 - 0.2$, $v < 40$ (20 - 40) m/s, gustoca struje $G > 30$ A/cm²
(trenutno do 100 A/cm²), ($\rho = 0.05 - 12 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
imaju zbog grafita dobru mogućnost podmazivanja, velike obodne brzine, zbog metala najmanje otpore,
najveća strujna opterećenja
Poznato je da u električnom stroju uvijek imamo više cetkica koje rade paralelno, te treba paziti da su
sve cetkice iste vrste kako bi i njihovo opterećenje bilo ravnomjerno. Istovremeno treba nastojati da su
paralelne cetkice iste duljine

4.4.6.6 Kolektori i koluti

Kolektori se izrađuju iz tvrdog bakra ili legura Cu/Ag
Koluti se izrađuju iz bronce (Bz)

5. MATERIJALI ZA ELEKTRICNE OTPORNIKE

Oni također spadaju u grupu vodljivih elemenata, ali za razliku od vodica u užem smislu od njih se traži čim veći specifični električni otpor. Možemo reći da je otpornik element strujnog kruga kojemu je zadatak da na sebe u različite svrhe preuzima jedan dio ili cijeli napon strujnog izvora. Svrha u koju otpornik preuzima napon je različita, te može biti: regulacija struje i napona, mjerne svrhe, pretvaranje struje u toplinu, svjetlost itd. Uvijek pri preuzimanju dijela ili cijelog napona struja, koja teče kroz otpornik, uzrokuje da otpornik na sebe preuzima određenu snagu. Kako će se otpornik ponašati u strujnom krugu određujemo njegovim dimenzioniranjem i to sa stanovišta:

velicine električnog otpora koji je potreban

velicine struje (presjek da ne pređe ili da dostigne temperaturu)

visine napona (da bude dovoljno izoliran)

Sa stanovišta snage i velicine otpora postoje dvije osnovne izvedbe:

Žicani (žice, trake, šipke i sl.)

neograničene snage

ograničeni omski otpor (< 100 k Ω)

velikih dimenzija

to područje pokrivaju metalni materijali

Nežicani (masivna otporna tijela, otporni slojevi)

ograničena snaga neograničeni omski otpor (cca 100 M Ω)
male (do minimalne) dimenzije
to područje pokriva poluvodnički materijal ili tanki slojevi

5.1 Žicani otpornici

Izrađuju se za snage od dijelova W do nekoliko kW

5.1.1 Osnovni zahtjevi na materijal su:

- veliki specifični električni otpor (vodljivost do 10 Sm/m², u praksi $\rho = 0,2-1,5 \Omega\text{m}^2/\text{m}$) iz toga zahtjeva želimo legure
- mali temperaturni koeficijent otpora zbog stabilnosti otpora u širem području (razni uzroci, jednom zbog preciznosti, drugi put zbog širokog područja upotrebe
- otpornost prema raznim kemijskim utjecajima (atmosfera podloga)
- otpornost na oksidaciju na radnoj temperaturi i načinu oksidiranja
- mali temperaturni koeficijent istezanja
- postojanost na starenje
- adekvatna mehanicka svojstva
- mali termoelektropotencijal (elektromotorna sila) prema bakru
- tehnološke sposobnosti
- oblikovanje (jednolika žica)
- spajanje

Navedeni zahtjevi se u većoj ili manjoj mjeri pojavljuju ovisno o vrsti i režimu rada. Sasvim je druga slika otpornika za snage mW ili za snage kW, za mA ili desetke ampera struje. Ipak kod svih su važni:

veliki specifični otpor
mali temperaturni koeficijent otpora
tehnološke sposobnosti (izrada)
zbog količine materijala, izrade i stabilnosti

Prema namjeni dijelimo ih u slijedeće grupe:

- opci (regulacijski)
- precizni (mjerni)
- žarni (za elektrotermiju)

Ovisno o primjeni od materijala se traže u većoj ili manjoj mjeri neki od navedenih zahtjeva.

5.1.2 Opci

Služe za regulaciju strujnih krugova, kao djelatnici napona i slično. To su otpornici vrlo širokog područja primjene pa želimo da su cim jeftiniji. Pri radu dolazi do njihovog zagrijavanja, ali u pravilu te temperature ne prelaze 200 °C, Njihove vrijednosti kreću se u vrlo širokom području.

Zahtjevi na materijale su:

određena toplinska postojanost
jeftin

U tu svrhu upotrebljavaju se legure na bazi željeza, iz kojih se izrađuju otpornici za velike snage, ali ne baš kvalitetni. Druga grupa legura su legure na bazi bakra, od kojih je najpoznatiji konstantan, koji po svojim svojstvima zadovoljava sve zahtjeve pa bi se mogao upotrijebiti i za precizne otpornike, ali ima veliku elektromotornu silu prema bakru što nije dozvoljeno kod materijala za precizne otpornike.

Konstantan

To je legura bakra i nikla (55% Cu i 45% Ni)

Svojstva

specifični električni otpor $\rho = 0,49 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$
temperaturni koeficijent otpora $\alpha = 0,00004 = 4 \cdot 10^{-5}/\text{K}$
elektromotorna sila prema bakru EMS = 43 $\mu\text{V}/\text{K}$ (4,3 mV/100 K)
dobra obradivost (daju se izvlaciti fine žice)
zadovoljavajuća toplinska postojanost

određenom toplinskom obradom dobije se na površini žice oksidni sloj koji može poslužiti kao izolacija i izdrži napon od jednog volta po zavoju.

Osim konstantana postoje i druge legure sličnih svojstava, kao što su:

Novo srebro, Argentan, Nikelin, (Cu/Ni/Zn), $\rho = 0.3 \text{ do } 0.4 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$, $\alpha = 20 \text{ do } 80 \cdot 10^{-5}/\text{K}$, Rezistin.

To su sve dosta robusne legure (materijali) kojima ne smeta zagrijavanje na temperaturi 300-600 °C pa ne stradaju od kratkotrajnih preopterećenja.

5.1.3 Precizni

Služe za ugradnju u mjerne uređaje, za pravljenje normalnih otpornika (etalona) i sl. U pravilu rade na sobnim temperaturama do 60 °C. Moraju biti precizni pa se postavljaju i posebni zahtjevi:

- minimalni temperaturni koeficijent otpora α
- minimalna EMS prema Cu
- vremenska stabilnost
- cijena nije bitna (uvjetno receno)

U to svrhu se upotrebljavaju materijali legure na bazi bakra (Cu/Mn/Ni ili Al) a najpoznatija, te u mnogim zemljama i jedina priznata legura u te svrhe je:

Manganin

To je legura bakra nikla i mangana (86% Cu 12% Mn i 2% Ni)

Svojstva

- specifični električni otpor $\rho = 0.43 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$
- temperaturni koeficijent otpora $\alpha = 0,00001 = 1.10^{-5}/\text{K}$
- elektromotorna sila prema bakru EMS = 1 $\mu\text{V}/\text{K}$ (0.1 mV/100 K)
- otporan na starenje (vremenska stabilnost dobiva se određenom toplinskom obradom osjetljiv na preopterećenja)

Osim manganina postoje i druge legure sličnih svojstava, kao što su:

Izabelin (84% Cu; 13% Mn; 3% Al), $\rho = 0,5\Omega \text{ m}^2/\text{m}$, $\alpha = -2.10^{-5}/\text{K}$, EMS = -0,2 $\mu\text{V}/\text{K}$, Therlo (85% Cu; 9,5% Mn, 5,5% Al) $\rho = 0,45 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$, Novokonstantan (82,2% Cu; 13,5 % Mn; 1% Fe; 3% Al), $\rho = 0,5 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$

Sve te legure rade na temperaturama do 60 °C, a ako predu te temperature gube karakteristike.

5.1.4 Žarni (elektrotermijski)

Služe za pretvaranje električne u toplinsku energiju, rade na temperaturama 900 - 1250 °C, pa odavde proizlaze i posebni zahtjevi. I ovi otpornici imaju vrlo široku primjenu.

Svojstva na koja treba narocito obratiti pažnju su:

- visoka toplinska postojanost (prisutna intenzivna oksidacija na povišenim temperaturama)
- mali toplinski koeficijent istezanja (pucanje oksida na površini)
- što manji temperaturni koeficijent otpora α
- tehnološke sposobnosti
- jednako izvlačenje
- homogeni sastav
- niska cijena

U tu svrhu s upotrebljavaju legure na bazi nikla i kroma te legure na bazi kroma i željeza. Njihove radne temperature su oko 1000 °C, a specifični otpori oko 1 $\Omega \text{ m}^2/\text{m}$. Osim tih ponekad se upotrebljavaju i specijalne legure na bazi Pt, W (C, SiC)

Legure Cr/Ni

a) Bez Fe (80% Ni; 20% Cr)

$\rho = 1,1 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$, $\alpha = 6.10^{-5}/\text{K}$, pogonska temperatura = 1100 -1150 °C

To su legure bez željeza, rade na najvišim temperaturama, ali im je sumpor štetan.

Trgovacki nazivi: nikrom, kromel, cekas II, kromin

b) Malo Fe (60 - 65% Ni; 15 - 20% Cr; 15 - 20% Fe)

$\rho = 1,1 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$, $\alpha = 8.10^{-5}/\text{K}$, pogonska temperatura = 1000-1050 °C

Postojane prema kiselinama, u sastavu se pojavljuje željezo, niža cijena ali i niža pogonska temperatura

Trgovacki nazivi: ferokromin, nikrom II, cekas

c) Mnogo Fe (20% Ni, 25% Cr, 55% Fe)

$\rho = 0,97 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$, $\alpha = 30.10^{-5}/\text{K}$, pogonska temperatura = 950-1000 °C

Mnogo željeza, niža pogonska temperatura, jeftinije

Trgovacki nazivi: cekas 0, cekas I, CNE

Vidljivo je da povećanje željeza smanjuje pogonsku temperaturu, povećava temperaturni koeficijent otpora α , i snižuje cijenu. Kad god nam uvjeti dopuštaju upotrijebiti cemo jeftinije legure.

Legure Cr/Fe

To su legure bez nikla pa su jeftinije. Toplinska postojanost im je visoka, ali nisu nehrdajuće pa ih treba staviti u zaštitnu atmosferu.

a) Cr/Fe/Si (20-30% Cr; 2,5% Si, ostatak Fe)

$\rho = 0,75-0,81 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$ (više Si veći ρ), $\alpha = 45 \cdot 10^{-5} 1/\text{K}$, pogonska temperatura = 900 - 1000 °C

b) Cr/Fe/Al (30% Cr, 65% Fe, 5% Al)

$\rho = 1,4 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ m}^2/\text{m}$, $\alpha = 3 \cdot 10^{-5} 1/\text{K}$, pogonska temperatura = 1300 - 1350 °C

Trgovacki nazivi: megapir, cekas extra, kantal

Specijalne legure

Platina (Pt+30% Rh), pogonska temperatura = 1300 °C (veoma skupa)

Volfram, Molibden, pogonska temperatura = 1700 °C, potrebna zaštitna atmosfera

Otporni štapovi

Silicijev karbid (SiC)

pogonska temperatura = 1400 °C, ima izrazito negativan temperaturni koeficijent otpora (otpor pri sobnoj temperaturi 2000 Ω , a na radnoj 1000 Ω).

Ugljen, grafit pogonska temperatura 2000 °C, oblik štapa, negativan temperaturni koeficijent otpora

5.2 Nežicani otpornici

To su otpornici napravljeni na bazi nemetala ustvari najčešće na bazi ugljika. Po izvedbi dijele se na masivne i na slojne s debelim ili tankim slojem

5.2.1 Masivni

a) koloidalni

otporni materijal + organsko vezivo

Izrada: oblikovanje, pečenje na 100 do 200 °C

b) keramicki

otporni materijal + anorganski materijal (keramika, staklo) + organsko vezivo

Izrada: oblikovanje, pečenje na 100 do 200 °C, paljenje na blizu 1000 °C (neutralna atmosfera), pri tome izgori organska komponenta, koja nam je poslužila kao tehnološko pomagalo

Prednost keramickih otpornika je viša toplinska postojanost. Otpor ovih otpornika je ovisan o sastavu smjese iz koje se izrađuju, podnose preopterećenja, dosta su robusni, nisu za visokofrekventnu tehniku imaju vlastiti kapacitet, otpor je ovisan o naponu, vremenom otpor im se mijenja - stare
Otporni materijali su silicijev karbid (SiC) i ugljik (C).

5.2.2 Slojni



a) s debelim slojem (> 5 μ)

koloidalni

otporni materijal (C) + organsko vezivo, na podlogu (keramika ili staklo), pečenje (≈ 100 °C)

keramicki

otporni materijal (C) + anorganski materijal (keramika, staklo) + organsko vezivo, na podlogu (keramika ili staklo)

Izrada: pastu koja je smjesa svih navedenih komponenti nanosimo na podlogu koja je od keramike ili stakla, pečenje na oko 100 °C, polimerizira organsko vezivo, paljenje u neutralnoj zoni (500 - 1000 °C) pri čemu organska komponenta nestane.

Paste

Paste se izrađuju na bazi paladija, platine, rutenija, talijevog oksida, ugljika. Slojevi do nekoliko desetaka μ debljine, a otpor sloja je dan za kvadratnu površinu i iznosi 1 Ω do 1 M Ω . Ne podnose preopterećenja, mogu u visokofrekventnoj tehnici. Povećanje otpora moguće je urezivanjem spirale u otporni sloj, ali se u tom slučaju otpornik ne može upotrijebiti u visokofrekventnoj tehnici.

b) sa tankim slojem (filmom < 5 μ)

otporni sloj se nanosi tehnikom tankog filma (kemijsko obaranje, napanje u vakuumu, prskanje ili ionizacija)

karbovidni: na bazi C kristalini sjajni ugljen

keramicki na bazi Cr/Ni, Cr/SiO₂, talijevi spojevi, kristalni ugljen

Otpor sloja iznosi 10 Ω do 10 M Ω , veoma su osjetljivi na preopterećenja

6. KONDENZATORI

Kondenzator je dio elektricnog kruga koji ima sposobnost da se u njega nakrca elektricni naboj Q, dakle može se reci da je kondenzator akumulator energije. Pri tome se kondenzator nabije na napon U, i to tako da je trenutna vrijednost naboja proporcionalna naponu. Struja kroz idealni kondenzator (koji ima samo cistu kapacitivnost bez ikakvih parazitnih velicina) jednaka je vremenskoj promjeni naboja Q:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

jed 2

Struja je dakle proporcionalna brzini promjene napona, a faktor proporcionalnosti C zove se kapacitet. Ako je napon sinusoidna oblika, struja kroz kondenzator takoder je sinusoidna, ali fazno pomaknuta za 90° u odnosu prema naponu. U tom je slucaju idealni kondenzator element kojemu struja punjenja prethodi narinutom naponu za fazni kut od 90° .

Svaki kondenzator izveden je od dvije vodljive plohe (obloge) medusobno odvojene izolatorom (dielektrikom). Kapacitet kondenzatora proporcionalan je dielektricnosti (dielektricnoj konstanti) izolatora e i to je veci što su površine vodljivih ploha vece a razmak medu njima (odreden debljinom izolatora) manji.

Kako kondenzator nije savršen, jer dielektrik nema beskonacan otpor, u svakom kondenzatoru se pojavljuje i radna komponenta struje koja određuje gubitke kondenzatora. Ukupna struja kroz kondenzator je $I = I_c + I_r$ i ona je fazno pomaknuta prema naponu za kut manji od 90° . Gubici kondenzatora se izražavaju kutom gubitaka δ odnosno njegovim tangensom $\tan \delta$ ($\delta = 90^\circ - \varphi$).

$$\tan \delta = \frac{I_c}{I_r} = \frac{1}{R? ?}$$

jed 3

Realni kondenzator prema tome predstavlja impedanciju apsolutne vrijednosti

$$Z = \frac{1}{\omega C \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}$$

jed 4

Osim gubitaka uslijed nesavršenosti kondenzatora u dielektriku izolatora dolazi do polarizacije, od kojih neke vrste polarizacije izazivaju dodatne gubitke.

6.1 Karakteristicne vrijednosti kondenzatora

Velicine koje karakteriziraju kondenzator su:

- nazivni ili nominalni kapacitet (ispisan na kucištu u $\mu\text{F}=10^{-6}\text{F}$, $\text{nF}=10^{-9}\text{F}$ ili $\text{pF}=10^{-12}\text{F}$)
- tolerancija
- temperaturno podrucje rada
- temperaturni koeficijent kapaciteta
- faktor gubitaka
- radnim maksimalni i ispitni napon

ponekad se navodi:

- vremenska konstanta kapaciteta (promjena kapaciteta nakon dvogodišnjeg uskladištenja)
- granica frekvencija
- parazitni induktivitet

6.2 Podjela kondenzatora

Kondenzatori se dijele na stalne i promjenljive. Kapacitet stalnog kondenzatora se ne može mijenjati nakon što je proizveden, dok se kapacitet promjenljivih kondenzatora može mijenjati u određenim granicama i nakon što je proizveden. Pri tome se kapacitet nekih kondenzatora može mijenjati tokom rada (promjenljivi kondenzatori) a nekima se kapacitet može mijenjati smo prilikom ugradnje ili popravka (polupromjenljivi kondenzatori), što ovisi o konstrukciji kondenzatora.

6.2.1 Stalni kondenzatori:

Stalni kondenzatori se dijele prema materijalu od kojeg su napravljeni na:

- Papirni kondenzatori

Imaju kao dielektrik trake od specijalnog papira (kondenzatorski papir) debljine $\sim 10 \mu\text{m}$, a kao vodljive obloge služe aluminijske folije debljine $\sim 7 \mu\text{m}$, koje su međusobno razdvojene najmanje dvjema slojevima papira. Trake se motaju spiralno, da bi se na malom prostoru dobio što veći kapacitet. Da bi papir zadržao dobra izolacijska svojstva, on se impregnira mineralnim uljima ili nekim drugim impregnantom kako bi se spriječilo prodiranje vlage u papir. Impregnacijom se povećava i probojna čvrstoća papira. Papirni kondenzatori se proizvode u vrlo širokom opsegu nazivnih vrijednosti ($0,1 \dots 200 \mu\text{F}$) i naponskih opterećenja (100 V do nekoliko kV). Nalaze svestranu primjenu u uređajima kojima gubici treba da budu mali i stabilnost velika. Upotrebljavaju se i u energetskim mrežama za kompenzaciju jalove snage ($\cos \phi$), uz kontakte za sprečavanje iskrenja, uz električne strojeve za otklanjanje radio smetnji i dr.

b) Kondenzatori od plasticnih masa

Dielektrik takovih kondenzatora izrađuje se od različitih umjetnih folija koje imaju odlična izolacijska i dielektrična svojstva pa ih nije potrebno impregnirati jer su otporni na vlagu. U načelu su slični papirnim kondenzatorima, samo što su kod njih dovoljne jednostruke izolacijske folije. Ove folije imaju male faktore gubitaka. Kao dielektrik upotrebljavaju se folije na bazi: polistirena (komercijalni naziv styroflex), tetrafluoretilena (teflon), polietilena (lupolen), polypropylena, polyestera i dr. Elektrode su im metalne folije. Upotrebljavaju se na visokim frekvencijama gdje su im gubici manji nego kod papirnih kondenzatora.

c) Keramicki kondenzatori

Keramicki kondenzatori imaju kao dielektrik keramiku, koja se može proizvesti sa sasvim temperaturnim koeficijentom kapaciteta. Proizvode se nanošenjem tankog sloja metala (naparavanjem) na obje strane keramičke pločice ili čevčice, koja se zatim premaže zaštitnim slojem. Ti kondenzatori su u pravilu vrlo stabilni. Ovisno o vrsti keramike različite su im i dielektrične konstante. Kondenzatori na bazi titan-oksida (rutila) i magnezijum-silikata imaju ϵ_r od $6 - 500$, a na bazi feroelektričnih materijala (barijum-titanati) imaju ϵ_r od $500 - 1000$.

d) Kondenzatori od tinjca

Tinjcevi kondenzatori imaju kao dielektrik tanke listice tinjca (muskovit) koji se odlikuju velikim izolacijskim otporom i dielektričnom konstantom $\epsilon_r \sim 6-7$. Ti kondenzatori su vrlo stabilni i odlikuju se malim temperaturnim koeficijentom kapaciteta te visokom toplinskom postojanošću.

e) Kondenzatori od stakla

Upotrebljavaju se za rad na visokim temperaturama (do $200 \text{ }^\circ\text{C}$) i tamo gdje je velika vlaga. Izrađuju se na sličan način kao kondenzatori od tinjca, s tim da se nakon formiranja podvrgavaju visokom pritisku i temperaturi.

f) Elektrolitski kondenzatori

Elektrolitski kondenzatori imaju samo jednu metalnu oblogu, zvanu anoda, a drugu oblogu čini otopina elektrolita. Kao izolacijski sloj (dielektrik) sliži sloj oksida koji se stvara u toku formiranja anodnom oksidacijom na metalnoj oblozi. Taj oksidni sloj, čija debljina iznosi $0,5-5 \mu\text{m}$ (već prema nazivnom naponu) ima vrlo veliku dielektričnu čvrstoću (10^7 V/cm) i veliku relativnu dielektričnu konstantu ϵ_r ($8-30$). Zbog male debljine i velike ϵ_r dielektrika dobivaju se znatno veće vrijednosti kapaciteta po jedinici zapremine nego s ostalim vrstama kondenzatora. Anoda je često hrapava čime se povećava kapacitet. Kao druga obloga rjeđe služi kompaktna otopina elektrolita, češće papir ili tkanina natopljena u takvoj otopini. Drugi je pol kondenzatora u tom slučaju spojen s elektrolitom pomoću još jedne dodatne metalne elektrode koja se naziva katodom. Oksidni sloj na anodi tvori zaporni sloj koji ima ventilsko djelovanje. Ono se očituje u tome što teče samo vrlo mala struja, tzv. poprečna struja ili struja gubitaka, ako je elektrolit negativan u odnosu prema anodi, a uz obratni polaritet teče znatna struja, koja stvara oksid uz katodnu oblogu, pri čemu se razvija znatna toplina dolazi i do razaranja kondenzatora. Zato su elektrolitskih kondenzatori polarizirani (priključci su označeni sa + i -), a za izmjenične struje se mogu primijeniti samo nepolarizirani elektrolitski kondenzatori koji su ekvivalentni dvjema polariziranim kondenzatorima spojenim u seriju tako da među izvodima slijede jedna za drugom katoda - anoda - anoda - katoda. Elektrolitski kondenzatori imaju sposobnost regeneracije, jer se u slučaju proboja uslijed toka struje razvija toplina, koja uzrokuje stvaranje novog oksida na mjestu proboja.

Materijal za elektrode elektrolitskih kondenzatora je aluminij ili tantal. Najčešće se izrađuju namatanjem anodne (aluminijske) folije nosača elektrolita i katodne folije, koji se nakon namatanja smjeste u aluminijsko kucište i kojim se spoji katoda, a pozitivni pol ima žičani izvod. Kao elektrolit upotrebljava se boraks, borna kiselina i drugi spojevi, pomiješani s glikolom i glicerinom. Elektrolitski kondenzatori

izrađuju se s nominalnim kapacitetima od 0,2 do 100 μF , za napone od 250 do 500 V i od 100 do 5000 μF za napone do 200 V. Faktor gubitaka kod ovih kondenzatora je relativno velik i iznosi $\tan \delta = 0,25$.

6.2.2 Promjenljivi kondenzatori

Kapacitet ovih kondenzatora može se mijenjati u određenim granicama i to mehanicki, najčešće zakretanjem osovine.

a) Polupromjenljivi kondenzatori (trimeri)

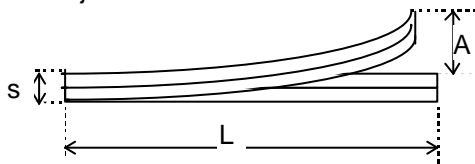
Ovi kondenzatori su predviđeni za podešavanje kapaciteta samo prilikom ugradnje, odnosno popravka. To su po svojim dimenzijama uglavnom mali, najčešće zračni ili keramicki kondenzatori, koji se dodaju paralelno nekom većem kondenzatoru da bi se ukupan kapacitet mogao podesiti na željenu vrijednost.

b) Promjenljivi kondenzatori

Njihova se vrijednost kapaciteta može mijenjati u toku rada uređaja u koji su ugrađeni. Kao dielektrik imaju najčešće zrak i izrađuju se sa dva niza paralelnih ploča od je jedan (stator) nepokretan, a drugi (rotor) pomican te se može zakretati oko osovine. Pri zakretanju osovine ploče rotora mijenjaju svoj položaj u odnosu prema položaju statora uslijed čega se mijenja i kapacitet kondenzatora. Ploče moraju biti međusobno izolirane, a kao izolacijski materijal se upotrebljavaju držaci od keramike. Ovi držaci određuju izolacijski otpor kondenzatora koji može iznositi i do 109 MW. Kondenzatori s cvrstim dielektrikom upotrebljavaju se tamo gdje smo ograničeni s prostorom. Uz dielektrik među pločama mora postojati i tanki sloj zraka, zbog mogućeg zakretanja, čija se debljina ne može točno odrediti niti održati na stalnoj vrijednosti, pa su takvi kondenzatori manje točni i manje stabilni od zračnih.

7. MATERIJALI ZA TERMOBIMETALE

Termobimetali su dva cvrsto vezana sloja metala ili njihovih legura s veoma različitim temperaturnim koeficijentima istezanja. Kod zagrijavanja dolazi do različitog istezanja svakog od njih, te se cijela kombinacija savija na stranu materijala s manjim temperaturnim koeficijentom istezanja, Područje upotrebe je od -20 do 250 $^{\circ}\text{C}$.



slika 11 Termobimetal

$$A = \frac{a}{s} \left(\frac{L}{100} \right)^2 \Delta t$$

A = otklon bimetal

a = specifični otklon bimetal (s = 1 mm, L = 100 mm, $\Delta t = 1$ $^{\circ}\text{C}$)

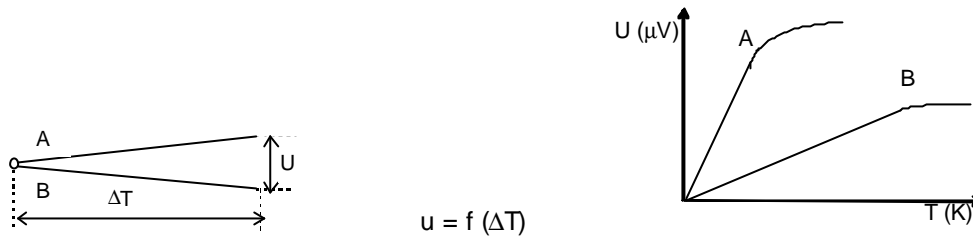
formula vrijedi ako je $s < 10 L$ i za manje otklone

U pravilu bi se mogla upotrijebiti bilo koja dva metala koja imaju različite temperaturne koeficijente istezanja ali se kao jedan od materijala najčešće upotrebljava **invar** (64% Fe, 36% Ni) zbog vrlo malog temperaturnog koeficijenta istezanja ($1 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$). Usporedbe radi bakar ima temperaturni koeficijent istezanja $17 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, Aluminij $24 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, Fe $10 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, Srebro $19 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, Nikal $13 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, Kositar $26 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, Molibden $5,2 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, Mangan $17 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.

Upotreba: mjerenje temperature, regulacija temperature, signalizacija, glasila, bojleri, peći

8. MATERIJALI ZA TERMOELEMENTE

Termoelement je vodljivi spoj dvaju različitih metala, kod kojih se na slobodnom kraju javlja potencijalna razlika, koja je proporcionalna razlici temperatura spojenog i slobodnog kraja. Za kontaktni potencijal je mjerodavna razlika u izlaznoj radnji i broju elektrona koji je različit za razne materijale. Ako je zatvoren krug ili ista temperatura na oba kraja nema razlike potencijala. Da bi došlo do efekta jedan kraj mora biti otvoren a drugi zatvoren, te se tada stvara potencijalna razlika, slika 12.



$u = f(\Delta T)$
slika 12 Termoelement

tablica 4 Pregled najčešćih termoelemenata

termoelement	osjetljivost ($\mu V/^{\circ}C$)	podrucje primjene ($^{\circ}C, K$)
Cu/konstantan	43	350
Fe/konstantan	50	600
Fe/kopel	55	600
kromel/kopel	80	600
kromel/alumel	41	900 - 1000
Ni/CrNi	40	900 - 1000
Pt/PtRh	7 - 10	1600
W/WMo	x	3000

Upotreba: mjerenje temperature, regulacija, signalizacija

Velicine napona su reda velicine $\mu V/^{\circ}C$, a podrucje upotrebe se poklapa s podrucjem linearnosti i toplinske postojanosti (0 do $> 1000^{\circ}C$)

Izvedbe:

u cijevima dužine 250, 500, 1000 mm, žice debljine 0,3 - 6,5 mm

9. RASTALNI OSIGURACI

Rastalni osigurac je element u strujnom krugu, kojemu je zadatak da u normalnim prilikama u strujnom krugu omogućuje normalni tok struje, ali kad velicina struje prijede kritične vrijednosti da svojim rastaljivanjem prekine strujni krug. To je najstariji oblik zaštite strujnih krugova. Po svom karakteru postoje razni strujni krugovi, razna dozvoljena opterećenja, razna preopterećenja pa i osiguraci moraju biti različiti kako po svojoj veličini tako i brzini djelovanja. Postoje:

Brzi osiguraci koji prekidaju strujni krug kada struja dostigne vrijednost $5 I_n$, 0,1 sekunde (kratki spoj prekidaju momentalno)

Spori osiguraci izdrže $10 I_n$ kroz 1 sekundu.

To se postiže izborom materijala i izvedbom samog osiguraca, slika 13, (utjecaj ambijenta, spirale, lemljenog mjesta i slicno)



slika 13 Razne izvedbe rastalnih osiguraca

Interesantna svojstva pri izboru materijala:

specifična toplina, toplina taljenja, talište, specifični otpor, toplinska vodljivost

Materijali: Potreban je vodički materijal, ali tako dimenzioniran, da omogućuje rastaljivanje kod određene prekomjerne struje. U obzir dolaze metali i legure

Srebro (Ag) može se upotrijebiti za sve struje, ima točno talište, može se precizno dimenzionirati naročito za manje struje (instrumenti) $< 3 A$

Legura Ag/Cu (50/50) za velike struje.

Bakar (Cu) za opće svrhe u obliku veoma tankih žica.

Aluminij (Al) je neprecizan, velika toplinska tromost, velika specifična toplina, izdrži preopterećenja, upotrebljava se za tromo osigurace, niski napon velike struje.

Legura Pb/Sn (olovo/kositar) za srednje struje, mehanicki mekana, ne mogu se izvlaciti tanke niti

Cink (Zn) nisko talište, ali treba biti oprezan jer pri naglom topljenju dolazi do prskanja što može uzrokovati stvaranje vodljivog sloja na površini kucišta osiguraca.

10. SPECIFICNE PRIMJENE POLUVODICKIH MATERIJALA

Poluvodici su nemetalni kemijski elementi ili kemijski spojevi, napose kemijski spojevi metala koji vode struju, ali znatno manji od metala. Uz to osnovno svojstvo pokazuju neke dodatne efekte, kojih metali nemaju pa im je to prednost. Njihova primjena ide u dva osnovna smjera

A) Nadopuna proizvoda u iste svrhe kao metali sa svrhom proširenje područja:

- kontakti (ne tale se, samopodmazivanje)
- otpornici (veliki otpori, tanki slojevi)
- elektrode; lucne lampe, zavarivanje, metalurgija (kemijska otpornost, visoko talište, ne otapaju se elektrolitski).

U tu svrhu upotrebljava se prvenstveno ugljik, razne njegove modifikacije (grafit, cada, koks, ugljen)

Ugljik (C) svojstva: 2200 °C grafitizacija, 3800 - 3900 °C topljenje, specifična masa 2 kg/dm³, specifični otpor = 46 Ω m²/m (ugljen) - 8,5 Ω m²/m (grafit), oksidira u obliku plina, ne zavaruje se, negativni temperaturni koeficijent otpora, otpor mu je ovisan o pritisku (mikrofoni, regulacijske otporne pločice)

B Specifne primjene

To su primjene kod kojih se koriste neke specifne prirodne ili umjetno izazvane sposobnosti određenih poluvodickih materijala.

Pri tome koristimo razne kombinacije (cisti poluvodic, poluvodic - poluvodic, poluvodic - metal)

10.1 Otpornici s ovisnošću elektricnog otpora o nekom vanjskom faktoru

10.1.1 Naponsko ovisni otpornici (VDR, wilit, tirit, ocelit)

kod metala vrijedi linearni odnos struje i napona $i = k U$, kod ovih otpornika vrijedi

$$i = k U^x \text{ gdje } x = 1.05 - 7$$

Materijali SiC + grafit + keramicko vezivo. Pod djelovanjem napona dolazi do proboja zapornog sloja i povecanje broja slobodnih elektrona, posljedica cega je povecanje vodljivosti. $\rho = 10^2 - 10^{10} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$,
Oblici: štapovi, cijevi, pločice, prsteni

Namjena: odvodnici prenapona, zaštitni otpornici, stabilizatori napona, ogranicivaci struje.

10.1.2 Temperaturno ovisni otpornici (NTC, Termistori)

$$R_T = R_{T_0} e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

R_{T_0} = hladni otpor, B = konstanta, T = temperatura

temperaturni koeficijent otpora (α) = 10 puta veci od metala i negativan ($\alpha \cong -10^{-2}/K$)

Materijali: mješavina metalnih oksida ili sulfida: AgS, CuO, MgO + TiO₂, ZnO

Upotreba se bazira na:

- ovisnosti otpora o temperaturi okoline (mjerenje temperature)
- ovisnosti otpora o zagrijavanju zbog vlastitog protoka struje
- termickoj tromosti (vremensko kašnjenje)
- nelinearnosti U - I karakteristike (stabilizacija napona)

Svojstva ovise i o tehnologiji dobivanja (temperaturi pecenja)

Oblici: štapovi, pločice

10.1.3 Fotootpri

Koristi se fotoelektricni efekt (unutarnji), apsorpcija svjetlosne energije oslobada nove elektrone, smanjuje se otpor, pri tome je prisutna valna osjetljivost. Osjetljivost se smanjuje porastom temperature.

Materijali talijev sulfid (talofidi), silicij, kadmijev sulfid

Prednosti: Visoka osjetljivost, male dimenzije

Primjena: regulacija, automatsko upravljanje

Oblici: štapovi, pločice

To su pasivni elementi

10.1.4 Fotoelementi

Aktivni elementi, pri osvjetljenju postaju izvor struje. To su kombinacije metal i poluvodic. Svjetlost pada na pokrivnu poluprozirnu elektrodu (Au) debljine nekoliko atoma. Zaporni sloj: pokrivna elektroda poluvodic, elektroni putuju u metal.

Materijali Cu_2O , Se, TIS, osjetljivost se mjeri u mA/lumen. Prisutna ovisnost osjetljivosti o valnoj dužini.

10.2 Kristalni ispravljači

Rade na principu tijesnog kontakta dva razlicita poluvodica posljedica cega je nejednolika vodljivost u oba smjera. To su poluvodicke diode koje su prakticki u potpunosti zamijenile nekada jako proširene suhe ispravljače, koji su radili na principu tijesnog kontakta poluvodic - metal.