

SVOJSTVA I PRIMJENA DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

UVOD

Dielektrik = grčki dia (kroz) + elektrik:

Dielektrik je materijal kroz koji prolazi električno polje, ali sam ne vodi električni naboj.

Pošto kroz dielektrike ne teče električna struja (ne prolaze naboji), oni spadaju po električnim svojstvima u IZOLATORE (tal. isolare - odvojiti, odijeliti, osamiti).

Na temperaturama bliskim **apsolutnoj nuli** kod dielektričnih materijala **valentni energijski pojas je potpuno popunjen, dok je vodljivi pojas potpuno prazan**. Širina pojasa zabranjenih energija ovih materijala pri niskim temperaturama je **veća od 2 eV**.

Energijsko stanje elektrona jednako je za dielektrične materijale u **tekućem i čvrstom** agregatnom stanju.

UVOD

Kod **plinovitih** dielektričnih materijala djelovanje između elektrona jednog atoma i jezgara okolnih atoma je zbog razmjerno velike udaljenosti slabo pa ne dolazi do dijeljenja energijskih razina i formiranja pojasa.

Između dielektričnih i poluvodičkih materijala u pogledu energijskih pojasa elektrona razlika je samo kvantitativna: širina zabranjenog energijskog pojasa kod dielektrika je znatno veća.

Zato dielektrični materijali na niskim i radnim temperaturama gotovo nemaju slobodnih elektrona, jer je za prijelaz elektrona iz valentnog u vodljivi pojas izvana potrebno privesti znatne energije (zagrijavanjem, zračenjem, električnim poljem).

U **vodljivim materijalima** nositelji naboja su **slobodni elektroni** koji pod utjecajem vanjskog električnog polja stvaraju električnu struju.

Kod **poluvodičkih materijala**, električnu struju tvore **elektroni** s energijama u vodljivom pojasu i **šupljine** (manjak elektrona) s energijama koje pripadaju nepopunjenom valentnom pojasu.

Kod **dielektričnih materijala** električnu struju tvore: **slobodni elektroni i šupljine, slobodni ioni i slobodne nabijene skupine molekula**.

Mali je broj dielektričnih materijala s elektronskom provodnošću. Takav je npr. rutil (titan dioksid, TiO_2) koji na 500°C ima slobodnih elektrona ili barijev, kalcijev, stroncijev titanati kod kojih su slobodni elektroni osnovni nositelji naboja.

U jakim električnim poljima na granici električnog proboja kod znatnog broja dielektričnih materijala elektroni su glavni nositelji naboja.

Kod brojnih dielektričnih materijala električna struja nastaje **usmjerenim gibanjem iona** pod djelovanjem električnog polja.

U plinovitim dielektričnim materijalima ioni nastaju **ionizacijom** (oslobađanjem elektrona i njegovim vezivanjem za neutralni atom) atoma plina svemirskim ili radioaktivnim zračenjem, zagrijavanjem i sl.

Koncentracija iona u plinovitim dielektričnim materijalima pri uobičajenim uvjetima je vrlo mala; na primjer zrak sadrži približno 10^{13} m^{-3} iona.

U tekućim i čvrstim dielektričnim materijalima ioni mogu nastati od **molekula ili atoma primjesa, vlage i nečistoća ili od molekula ili atoma osnovnog materijala.**

Među dielektričnim materijalima postoje i takvi, kao što su neki lakovi i ulja, u kojima su pokretni nositelji naboja **skupine nabijenih molekula**. To su **koloidni sustavi** koji predstavljaju smjesu dva materijala (dvije faze).

Prva faza je u obliku sitnih čestica (kapi, zrna, prašine) i jednoliko je raspoređena u drugoj fazi (tekućina).

Od koloidnih dielektričnih materijala najznačajnije su **emulzije** (obje faze su tekuće) i **suspencije** (prva faza je čvrsta, druga tekuća).

Emulzije i suspencije su trajno stabilne. Nabijene čestice prve faze su nositelji naboja. U električnom polju dolazi do *usmjerene gibanja nabijenih čestica*; to je pojava koja se naziva **elektroforeza** (grč. lat. elektro + foreus nosač; putovanje koloidnih čestica u otopinama pod djelovanjem električnog polja).

Elektroforeza se, na primjer, koristi pri nanošenju kaučuka ili smola iz njihove suspenzije na metalne površine.

Neka je dielektrični materijal izložen utjecaju vremenski nepromjenjivog **električnog polja**, na primjer materijal između elektroda priključenih na istosmjerni napon.

Opravdano je očekivati da će izolator na određeni način reagirati na narinuto električno polje, jer se u njemu nalaze pozitivni i negativni naboji na koje vanjsko polje djeluje suprotno usmjerenim silama.

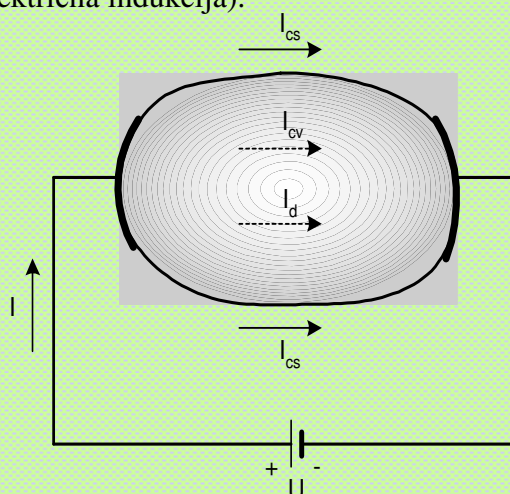
Pomak "**vezanih**" **naboja** (negdje se zovu i prostorni naboji – engl. space charge) trajat će sve dok se ne završi proces **polarizacije**.

Proces polarizacije dielektričnog materijala moguće je opisati strujom dielektričnog pomaka čija je gustoća:

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (6.1)$$

gdje je \vec{D} električni pomak (električna indukcija).

Pored ovog procesa u razmatranom dielektričnom materijalu, zbog postojanja neke male, ali konačne, koncentracije **slobodnih nositelja naboja**, postoji i **kondukcijska** (vodljiva) struja čija je gustoća J_c .
Lat. kon + ducere voditi;
vodljivost, sposobnost vođenja



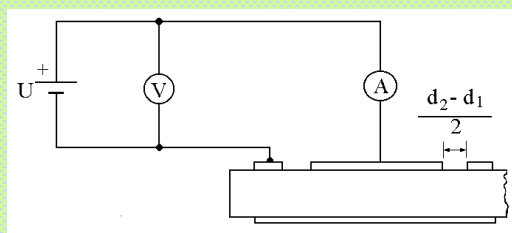
U dielektričnom materijalu izloženom **vremenski nepromjenjivom električnom polju**, nakon završetka procesa polarizacije, **postoji samo kondukcijska struja**. Proces polarizacije za većinu dielektričnih materijala traje kraće od 10^{-12} sekundi.

U tekućim i čvrstim dielektričnim materijalima kondukcijsku struju tvori **površinska I_{cs}** i **volumna I_{cv}** komponenta pa je moguće definirati odgovarajuće **volumnu i površinsku električnu otpornost**.

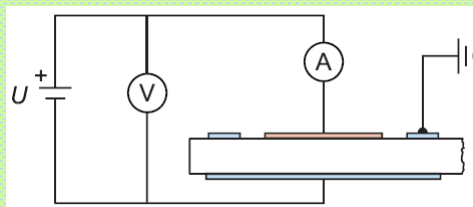
Volumna električna otpornost ρ čvrstih dielektričnih materijala ovisi o temperaturi, vlazi, kemijskom sastavu i primjesama, jakosti električnog polja, itd.

Na površinsku električnu otpornost ρ_s čvrstih dielektričnih materijala utječe: relativna vlažnost okoline, čistoća i poliranost površine, poroznost i polariziranost, itd.

Električna otpornost tekućih dielektričnih materijala ovisi o: sadržaju nečistoća (voda, druge tekućine, vlakna, prašina i sl.), temperaturi, jakosti električnog polja, itd.



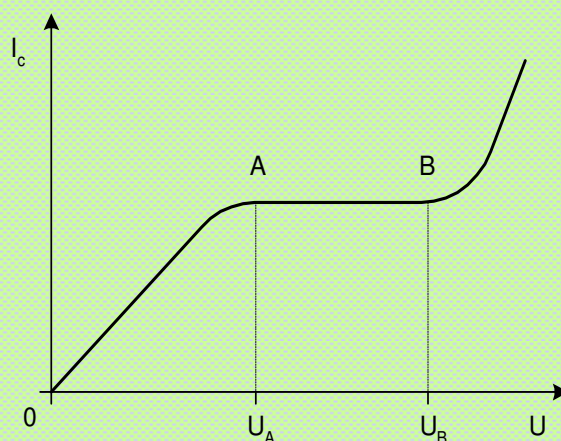
U-I postupak za mjerenje površinske otpornosti kružnim elektrodama



U-I postupak za mjerenje volumne otpornosti kružnim elektrodama.

Kod plinovitih dielektričnih materijala ovisnost kondukcijske struje o naponu prikazana je donjom slikom. Uočava se:

- područje OA - područje linearne ovisnosti (Ohmov zakon);
- područje AB - područje zasićenja;
- područje iznad B - područje udarne ionizacije.

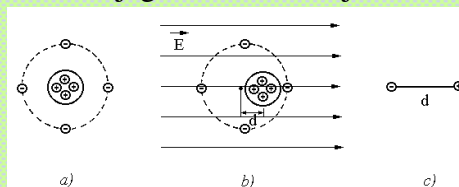


POLARIZACIJA DIELEKTRIKA

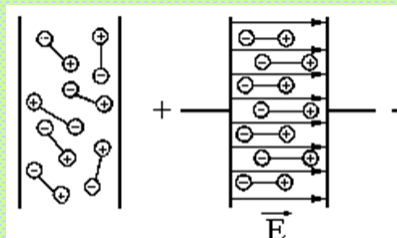
Ovo je jednostavno objašnjenje
za druge smjerove!

Dva su tipa izolatora:

- koji su neutralni u nepobuđenom stanju, **nepolarni**. Ako se takav atom postavi u vanjsko električno polje, doći će do djelovanja elektrostatičkih sila i do njegove deformacije. Pod tim djelovanjem jezgra i elektronski omotač dobit će novi ravnotežni položaj. Nastaje el. dipol.



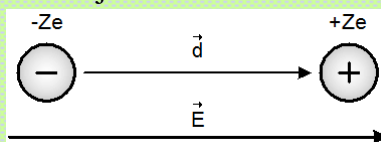
- koji zbog svoje građe već imaju električni dipolni moment bez djelovanja vanjskog polja, **polarni**.



POLARIZACIJA

Dat je izolator na kojeg djeluje **vremenski stalno električno polje**. Na razini atoma učin polja lako je razabrati. Sile djelujući u suprotnom smjeru na elektrone i jezgru atoma, malo će pomaknuti jezgru iz njezina središnjeg položaja pa se težišta pozitivnog i negativnog naboja više ne poklapaju kao na slici.

Kaže se da je atom polariziran (**elektronska polarizacija**), a **stupanj polarizacije** određen je razmakom središta pozitivnog i negativnog naboja i veličinom naboja. Ovakva vezana cjelina dvaju suprotnih naboja na određenom razmaku naziva se **električni dipol**.



A sada zakomplicirajmo!
Polarizacija se može događati uz **stalno i uz promjenjivo vanjsko E**

Razumijevanje polarizacije je ključ razumijevanja svojstava dielektričnih materijala.

Električni dipolni moment je:

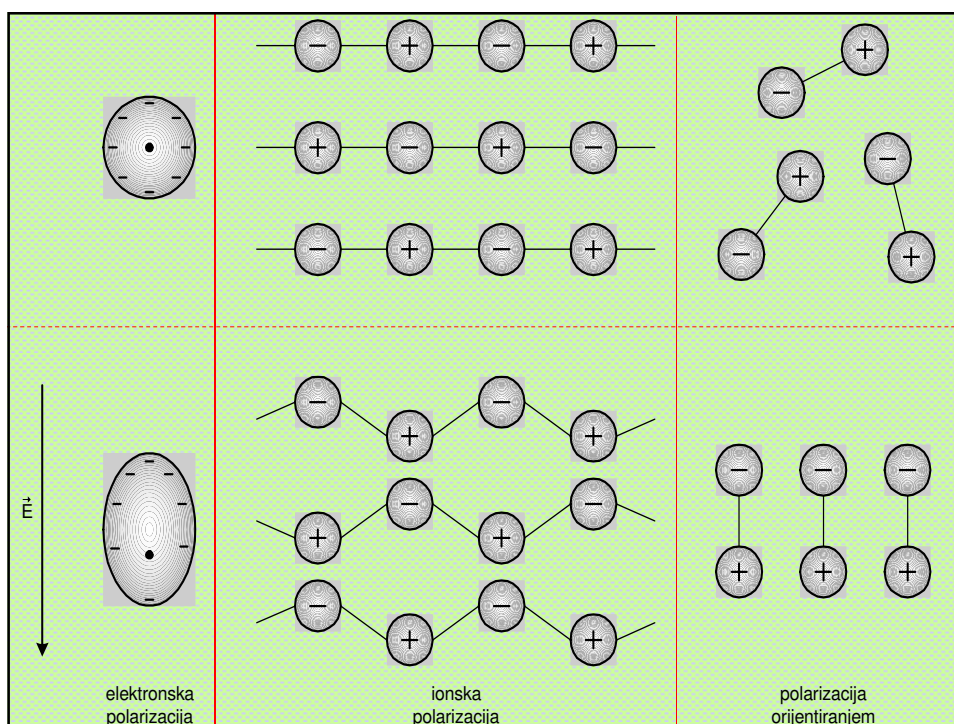
$$\vec{p} = Ze\vec{d}$$

Zbroj svih p daje vektor polarizacije $P!$

To je vektor kojem je smjer određen spojnicom dvaju naboja, a orijentiran je od negativnog k pozitivnom naboju (tim dogovorom električni dipolni moment ima smjer narinutog električnog polja); Z je redni broj atoma u periodskom sustavu elemenata. Spomenuta električna polarizacija javlja se u svim dielektričnim materijalima.

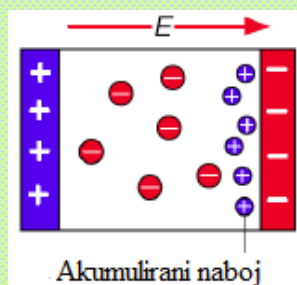
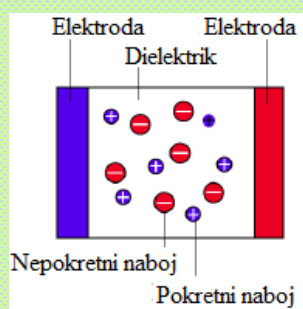
Ionska polarizacija nastaje pomakom iona dielektričnog materijala pod djelovanjem električnog polja. Javlja se kod dielektričnih materijala s ionskom vezom.

Polarizacija orijentiranjem nastaje usmjeravanjem permanentnih električnih dipola dielektričnog materijala u pravcu električnog polja. Javlja se uglavnom kod plinovitih, tekućih i nekih amorfnih viskozni čvrstih dielektričnih materijala. Kod polarizacije dielektričnog materijala mogu postojati sva tri oblika polarizacije prikazana slikom:



Interfacijalna (**dodirna**) polarizacija *ili međuzrnasta* (engl. interfacial polarization) se događa uvijek kada postoji akumulacija naboja **na površini između** dva materijala ili između dva područja unutar materijala.

Jednostavni primjer međuzrnaste polarizacije je kada se akumulira naboje u dielektriku blizu jedne od elektroda kao na slici:



Kako god bili savršeni, u materijalima se nalaze kristalni defekti, nečistoće i različiti pokretni nositelji naboja, poput elektrona (iz donorskih nečistoća), šupljina ili iona temeljnog materijala ili nečistoća.

Na lijevoj slici prethodni slide, materijal ima jednaki broj pozitivnih i negativnih iona, ali je pretpostavljeno da su pozitivni ioni puno mobilniji. Npr. ako postoje H^+ ioni (proton) i Li^+ ioni u nekoj keramici ili staklu, oni su pokretljiviji od negativnih iona, jer su relativno maleni.

Kada se narine električno polje, ovi pozitivni ioni migriraju prema negativnoj elektrodi.

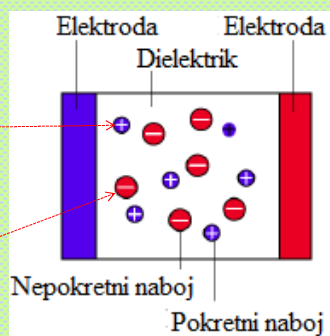
Pozitivni ioni ne mogu napustiti dielektrik i ući u kristalnu strukturu metalne elektrode, nego se **gomilaju na dodirnom području** (engl. interface) i daju doprinos pozitivnom prostornom naboju u blizini elektrode.

Ovi pozitivni naboji na dodirnom području privlače više elektrona prema negativnoj elektrodi. Ovi dodatni naboji na elektrodi iskazuju se kao **pojačanje dielektrične konstante**.

Pojam interfacijalne polarizacije nastaje zbog toga što se pozitivni naboji koji se akumuliraju na prijelazu (interface) i ostatak negativnog naboja stvaraju dipolne momente koji se pojavljuju u polarizacijskom vektoru, P (P pribraja sve dipole u materijalu po jedinici volumena).

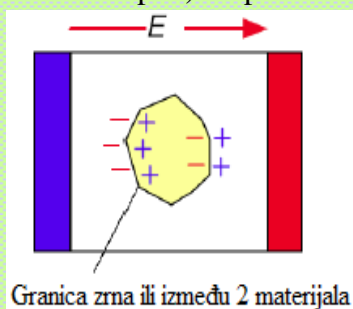
Drugi tipični mehanizam interfacijalne polarizacije je hvatanje elektrona ili **šupljina** na defektima kristalne rešetke, na dodiru između kristala i elektrode.

U ovom slučaju pozitivni naboji su šupljine, a negativni **imobilizirani ionizirani akceptori**.



U ovom slučaju može se vidjeti pozitivne naboje kao šupljine, a negativne kao ione akceptora u slici. Prepostavljeno je da kontakti blokiraju i ne dopuštaju elektornima ili šupljinama da se injektiraju, tj. ne dopuštaju izmjenu između elektroda i dielektrika. U prisustvu polja, šupljine strujaju prema negativnoj elektrodi i upadaju u zamku u defektima na dodirnom području.

Granice zrna često vode na interfacijalnu polarizaciju, jer mogu zarobiti naboje koji migriraju pod utjecajem narinutog polja (vidi sliku ispod). Dipoli između zarobljenih naboja pojačavaju vektor polarizacije.



polarizacije.

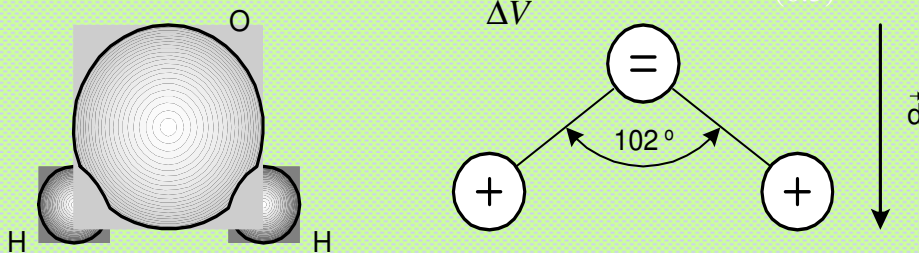
Dodirna područja povećavaju se u heterogenim dielektricima, gdje dolazi do disperzne faze unutar kontinuirane faze.

Načelo je isto kao što je to shematski ilustrirano na slici.

Kod molekula kao što su kalijev klorid KCl ili sličnima porijeklo elementarnih dipola je posve jasno. Atomi kalija i klora u molekuli se već nalaze kao raznoimeni ioni, a to vrijedi i za sve spojeve s ionskom vezom. Kod molekule vode (vidi sliku) permanentni dipol nastaje zbog nesimetrije molekule i osobite raspodjele električnog naboja u molekuli.

Makroskopska veličina koja opisuje stupanj polarizacije dielektričnog materijala je **vektor polarizacije**, \vec{P} , a određen je omjerom vektorskog zbroja električnih dipolnih momenata i elementarnog obujma ΔV :

$$\vec{P} = \frac{(\sum \vec{p})_{u(\Delta V)}}{\Delta V} \quad (6.3)$$



Vektori jakosti električnog polja, \vec{E} , električnog pomaka, \vec{D} , i polarizacije, \vec{P} , povezani su relacijom:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

gdje je ϵ_0 dielektričnost (permitivnost) vakuuma ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Kod velikog broja dielektričnih materijala između vektora polarizacije i vektora jakosti električnog polja u nekoj točki dielektričnog materijala postoji linearna ovisnost:

$$\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E} = \alpha \vec{E}$$

gdje je:

- χ_e **električna susceptibilnost**
- α je **konstanta polarizacije** dielektričnog materijala.

Dielektrični materijali za koje vrijedi navedena relacija su linearni.

Uvrštenjem slijedi:

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e$$

gdje je ϵ_r **relativna dielektrična konstanta**.

Moguća je jednostavna definicija:

tvar u kojoj je $\epsilon_r > 1$ naziva se dielektrikom.

Poseban značaj ima relacija između makroskopskih veličina χ_e i ϵ_r te atomističkih veličina.

Za čvrste materijale, kod kojih se javlja **samo elektronska polarizacija**, vrijedi **Clausius - Mossottieva jednadžba**:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n\alpha_e}{3\epsilon_0} \quad \text{tj.} \quad \chi_e = \frac{\frac{n\alpha_e}{\epsilon_0}}{1 - \frac{n\alpha_e}{3\epsilon_0}} \quad \epsilon_r = \frac{1 + \frac{2n\alpha_e}{\epsilon_0}}{1 - \frac{n\alpha_e}{3\epsilon_0}}$$

Veza između mikro i makro svijeta!!!

gdje je n broj atoma ili molekula u jediničnom volumenu, a α_e je konstanta elektronske polarizacije.

Za plinove vrijedi:

$$\chi_e = \frac{n\alpha_e}{\epsilon_0}$$

Veza između mikro i makro svijeta!!!

$$\epsilon_r = 1 + \frac{n\alpha_e}{\epsilon_0}$$

Vrijedi samo uz pretpostavku da postoji samo elektronska polarizacija te da je lokalno električno polje jednako narinutom E , što može biti točno samo za razrijeđene plinove.

Relativna dielektrična konstanta određenog materijala ovisi o brojnim vanjskim utjecajima:

- **temperaturi,**
- **vlažnosti,**
- **tlaku,**
- **frekvenciji izmjeničnog polja, itd.**

Kod **dielektričnih materijala bez permanentnih dipola s dominantnom elektronskom polarizacijom** ϵ_r se smanjuje s porastom temperature. Ovo je posljedica širenja materijala, odnosno smanjenja koncentracije molekula.

U **dielektričnim materijalima bez permanentnih dipola s dominantnom ionskom polarizacijom** u većini slučajeva ϵ_r raste s porastom temperature (kod nekih se ϵ_r najprije smanjuje, a onda raste).

Za dielektrične materijale s permanentnim dipolima ϵ_r u početku raste s porastom temperature, prolazi kroz maksimum, a zatim se smanjuje.

Pri nižim vrijednostima povećanje temperature olakšava orijentaciju permanentnih dipola.

Na višim temperaturama termičko gibanje molekula otežava orijentaciju dipola.

Veličina koja opisuje ovisnost relativne dielektrične konstante o temperaturi je **temperaturni koeficijent dielektrične konstante**:

$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{d\varepsilon_r}{dT}$$

Zbog ovisnosti ε_r o temperaturi mijenjaju se i značajke elemenata s dielektričnim materijalima (na primjer kapacitet kondenzatora).

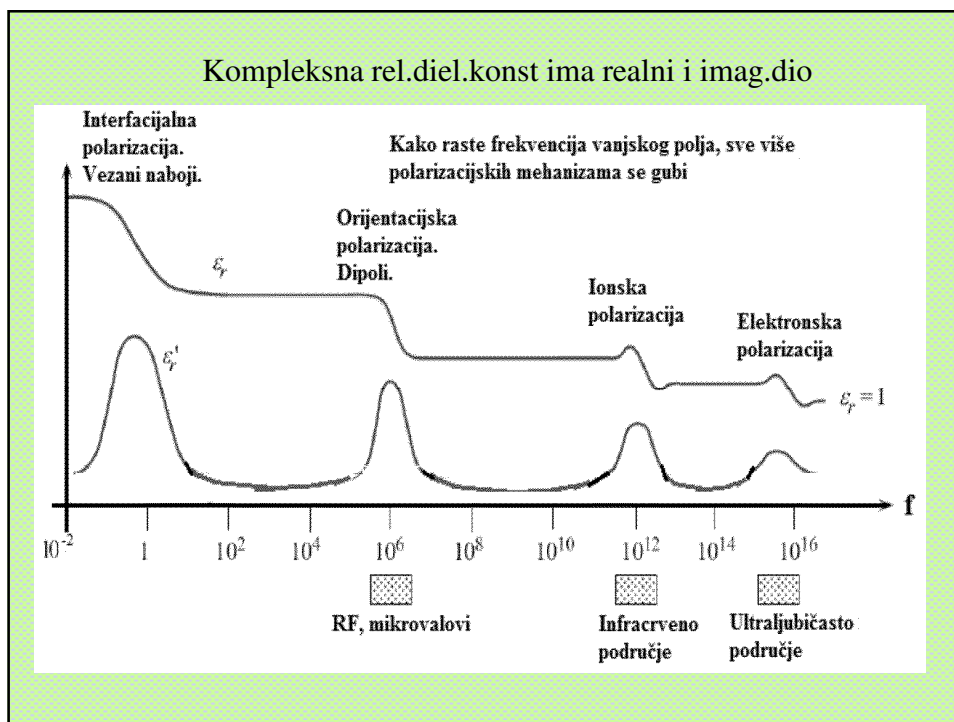
Kod higroskopičnih dielektričnih materijala ε_r raste s povećanjem **vlažnosti**. Istodobno **se pogoršavaju** neke druge karakteristike materijala (**površinska i volumna otpornost, dielektrični gubici i dielektrična čvrstoća**).

Povećanjem **tlaka** povećava se koncentracija molekula pa u slučaju *plinovitih dielektričnih materijala raste ε_r* .

Kod tekućih i čvrstih dielektričnih materijala ova ovisnost je praktično beznačajna.

S obzirom da polarizacije potječu iz 4 različita fizikalna uzroka, može se očekivati da će i njihovo ponašanje u promjenjivom električnom polju biti različito. Za elektronsku polarizaciju može se pretpostaviti da će **slijediti i vrlo brze promjene polja**. Kod polarizacije orijentacijom, **promjenu polja slijedi čitava molekula** pa se očekuje različito ponašanje.

Ionska polarizacija prestaje u infracrvenom dijelu spektra, elektronska u ultraljubičastom, a orijentacijska pri relativno niskim frekvencijama, dok na najnižim frekvencijama prestaje interfacijalna.



DIELEKTRIČNI GUBICI

Dielektričnim gubicima naziva se onaj dio električne energije koji se u jedinici vremena nepovratno pretvori u dielektričnom materijalu u druge oblike energije, pretežito u toplinu.

Dielektrične gubitke uzrokuju:

- Jouleovi (omski) gubici,
- polarizacijski gubici,
- gubici zbog ionizacije i
- gubici zbog nehomogenosti materijala.

Jouleovi (omski) gubici javljaju se u svim dielektričnim materijalima čija je električna provodnost veća od nule. Ovi gubici su više izraženi u tekućim i čvrstim nego u plinovitim dielektričnim materijalima.

DIELEKTRIČNI GUBICI

Dielektrični gubici zbog Jouleovog učinka postoje u vremenski neovisnim i ovisnim poljima i **praktično ne ovise o frekvenciji** narinutog polja.

Ovi gubici znatno rastu s porastom temperature, jer se pritom povećava električna provodnost dielektričnih materijala.

Polarizacijski se gubici javljaju u dielektričnim materijalima s orijentacijskom polarizacijom (s permanentnim električnim dipolima) i u nekim materijalima s ionskom polarizacijom.

Vanjsko električno polje narušava termičko gibanje atoma ili molekula što dodatno zagrijava dielektrični materijal.

Ovi gubici imaju maksimum na temperaturi karakterističnoj za pojedini dielektrik.

U dielektrične gubitke zbog polarizacije spadaju i rezonantni gubici koji nastaju pri određenim frekvencijama narinutog polja.

DIELEKTRIČNI GUBICI

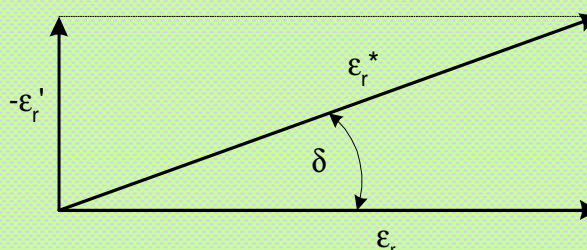
Dielektrični gubici **zbog ionizacije** javljaju se pretežno u plinovitim dielektričnim materijalima. U jakim električnim poljima energija se gubi pri ionizaciji molekula ili atoma dielektrika.

Dielektrični gubici **zbog nehomogenosti** javljaju se u slojevitim dielektričnim materijalima. Ovisi o sastavu materijala i primjesa (nečistoća).

Makroskopska veličina koja je **mjera dielektričnih gubitaka** je **snaga dielektričnih gubitaka**, odnosno u slučaju sinusne vremenske ovisnosti narinutog polja, **kut dielektričnih gubitaka δ** .

Moguće je definirati **kompleksnu relativnu dielektričnu konstantu**:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r - j\epsilon_r'$$



Realni dio permitivnosti ϵ_r **mjera je pohranjene energije** vanjskog električnog polja. **Imaginarni dio** relativne dielektrične konstante **mjera je dielektričnih gubitaka** u materijalu pod utjecajem vanjskog električnog polja. Obično je znatno manjeg iznosa od ϵ_r . Kod prikaza u kompleksnoj ravnini vektor ϵ_r^* tvori kut δ (kut dielektričnih gubitaka) s realnom osi:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon_r'}{\epsilon_r}$$

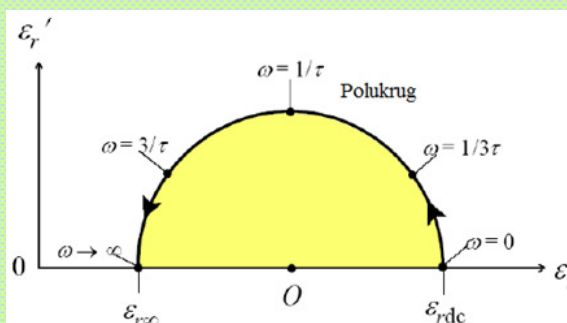
Kvalitativni prikaz ovisnosti dielektrične konstante ϵ_r o frekvenciji električnog polja f treba nadopuniti i ovisnošću imaginarnog dijela.

PROMJENJIVA POLJA: Cole-Cole graf

U proučavanju dielektričnih materijala uobičajeno je prikazivati dijagram imaginarnog nasuprot realnog dijela kompleksne relativne dielektrične konstante kao funkciju frekvencije.

Takvi se dijagrami zovu Cole-Cole dijagrami (grafovi). Ako se postavi da je $\tau = 1s$ može se izračunati imaginarna naspram realne komponente za $\omega = 0$ i $\omega \rightarrow \infty$.

Rezultat ovakvog izražavanja je polukrug. Za neke materijale kao što su plinovi i neke tekućine Cole-Cole dijagram je stvarno polukrug. Kod ostalih materijala dijagram može biti asimetričan.



DIELEKTRICI U

PROMJENJIVIM POLJIMA

S obzirom da polarizacije potječu iz četiri različita fizikalna uzroka, možemo očekivati da će, ovisno o njima, i njihovo ponašanje u promjenjivom električnom polju biti različito.

Za **induciranu elektronsku polarizaciju** možemo očekivati da će slijediti i vrlo brze promjene polja.

Kod **polarizacije orijentacijom**, promjenu polja treba slijediti čitava molekula, pa očekujemo različito ponašanje. Kvalitativno ovisnost dielektrične konstante ϵ_r o frekvenciji električnog polja ω ima oblik prikazan na slici na slide-u 27.

Ionska polarizacija prestaje u infracrvenom dijelu spektra, elektronska u ultraljubičastom, orijentacijska pri relativno niskim frekvencijama, a na najnižim frekvencijama **prestaje i interfacijalna**.

DIELEKTRICI U

PROMJENJIVIM POLJIMA

Maxwellove jednačbe daju veze između dielektrične konstante vakuma ϵ_0 , permeabilnosti vakuma μ_0 i brzine svjetlosti u vakumu:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

U nekom materijalu brzina svjetlosti smanjuje se na:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

gdje su ϵ_r i μ_r relativna dielektrična konstanta i relativna permeabilnost materijala.

DIELEKTRICI U PROMJENJIVIM POLJIMA

Za neferomagnetske materijale je $\mu_r \sim 1$ pa slijedi:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c_0}{n}$$

Desna strana je neovisan empirički zakon, izveden u optici:

$$c = \frac{c_0}{n}$$

Tako npr. indeks loma vode je $n=1,33$. Čini se da bi onda relativna dielektrična konstanta trebala imati vrijednost $\epsilon_r = 1,33^2$, dok je ustvari za vodu $\epsilon_r \sim 80$.

O čemu se radi daje objašnjenje krivulja frekvencijske ovisnosti o ϵ_r .

DIELEKTRICI U PROMJENJIVIM POLJIMA

U području **optičkih frekvencija ostaje još samo inducirana elektronska polarizacija.**

Polarizacija zbog permanentnih dipola nestala je već pri puno nižim frekvencijama polja u području, počevši od ultrakratkih valova do mikrovalnog područja.

Voda je interesantna (a to vrijedi i za mnoge druge tvari pri promjeni agregatnih stanja) zbog toga što pri sleđivanju njena dielektrična konstanta postaje jako ovisna o frekvenciji električnog polja.

U ledu permanentni dipoli vode trebaju mnogo vremena da bi se mogli orijentirati.

DIELEKTRICI U PROMJENJIVIM POLJIMA

Brzina uspostavljanja polarizacije karakterizira se **vremenom relaksacije (τ)** koje određuju brzinu promjene polarizacije:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [P_0 - P(t)]$$

tj. brzina promjene polarizacije razmjerna je razlici između statičke vrijednosti P_0 i trenutne vrijednosti polarizacije $P(t)$.

Slijedi:

$$P(t) = P_0(1 - e^{-t/\tau})$$

FIZIKALNI MODEL OVISNOSTI ELEKTRONSKOG DOPRINOSA O FREKVENCiji

Iz jednostavne fizikalne predodžbe moguće je dobiti ovisnost relativne dielektrične konstante o frekvenciji.

Razmotrimo elektronsku polarizaciju. Naš model vrijedi prema tome na frekvencijama kod kojih se orijentacijska polarizacija može zanemariti.

Neka na atom djeluje električno polje frekvencije ω , tj.

$$E = Ee^{i\omega t}$$

i uzmimo da je naboj jezgre jednak e , tj. promatramo vodikov atom.

Možemo pisati jednadžbu gibanja pod djelovanjem sile na naboj: $eE - kx = m$

FIZIKALNI MODEL OVISNOSTI ELEKTRONSKOG DOPRINOSA O FREKVENCiji

gdje je x pomak središta elektronske raspodjele naboja prema jezgri. Produkt kx je povratna sila koju smo računali kod inducirane elektronske polarizacije atoma stalnim električnim poljem. Odatle slijedi:

$$k = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R^3}$$

Elektron titra pod djelovanjem polja frekvencije ω , pa prema tome također s tom frekvencijom. To se može opisati jednadžbom:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{eE_0}{m}e^{i\omega t} = E$$

FIZIKALNI MODEL OVISNOSTI ELEKTRONSKOG DOPRINOSA O FREKVENCiji

Slijedi rješenje:
$$x_0 = \frac{eE_0/m}{(k/m - \omega^2)}$$

Tj.
$$x = \frac{eE_0/m}{(\omega_0^2 - \omega^2)}e^{i\omega t}$$

Omjer k/m određuje rezonantnu frekvenciju atoma:
$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

Dipolni moment i elektronska polarizacija – nepolarni dielektrici

U odsustvu električnog polja, centar mase orbitirajućih elektrona i jezgre se poklapaju te je rezultirajući moment jednaku nuli. Z – broj elektrona koji orbitiraju.

Kada se narine vanjsko polje, E , centar mase elektrona se pomiče u odnosu na centar mase jezgre.

Vanjsko polje razdvaja elektrone i jezgru, a Coulombovo privlačenje daje suprotan učin.

Sila vanjskog polja na elektrone je ZeE , a sila Coulombovog privlačenja može se iskazati i razmjerno pomaku x kao βx .

Izjednačavajući sile imamo:

$$ZeE = \beta x.$$

Dipolni moment i elektronska polarizacija – nepolarni dielektrici

Iznos inducirano elektronskog dipolnog momenta je:

$$p_e = (Ze)x = \left(\frac{Z^2 e^2}{\beta} \right) E$$

što znači da je dipolni moment razmjernan s E .

Sada pretpostavimo da smo naglo isključili vanjsko polje.

Ostat će nam gibanje zbog inercije i Coulombovo privlačenje:

$$-\beta x = Zm_e \frac{d^2 x}{dt^2} \quad \text{akceleracija}$$

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\beta}{Zm_e}} \quad \text{Oscilacijska } f \text{ centra mase elektronskog oblaka.}$$

To je rezonantna f elektronske polarizacije

Dipolni moment i elektronska polarizacija – nepolarni dielektrici

To je analogno ponašanju opruge kod harmoničkog titranja – FIZIKA.

Poznato je da akcelerirajući naboj emitira zračenje slično odašiljačkoj anteni. Stoga se ta energija gubi i oscilacije smanjuju te se iz tog razmatranja može dobiti izraz za polarizabilnost:

$$\alpha_e = \frac{Ze^2}{m_e \omega_0^2}$$

Debyeova jednadžba

Razmotrimo slučaj kad orijentacijska i elektronska polarizacija, α_d i α_e , doprinose ukupnoj polarizaciji. **Elektronska polarizacija neovisna je o frekvenciji unutar radnog područja dipolarnog dielektrika** što je ispod optičkih frekvencija.

Na velikim frekvencijama orijentacijska polarizacija biti će svedena na nulu, te će biti $\epsilon_r = \epsilon_{r\infty}$.

Indeks ∞ znači da je zanemariva orijentacijska polarizacija. U tim uvjetima dielektrična konstanta je:

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rdc} - \epsilon_{r\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}$$

na istosmjernom polju *na polju jako velike f* *vrijeme relaksacije recipročno rez. frekv.*

$$\epsilon_r' = \frac{(\epsilon_{rk} - \epsilon_{r\infty})(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2}$$

frekvencija vanjskog polja

Debyeova jednađžba

Debyeova jednađžba je tijekom godina modificirana da bi uključila relaksacijske vrhove koji su primjećeni kod polimernih dielektrika.

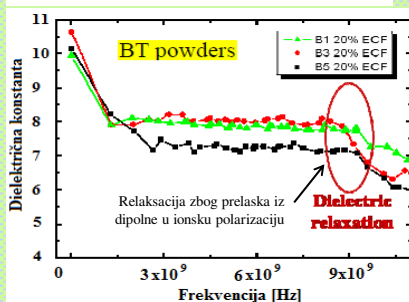
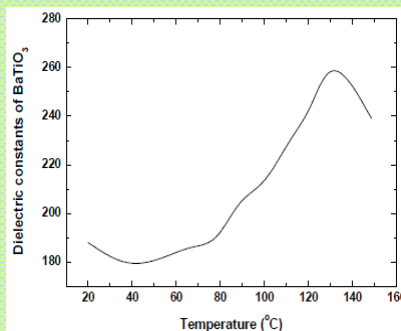
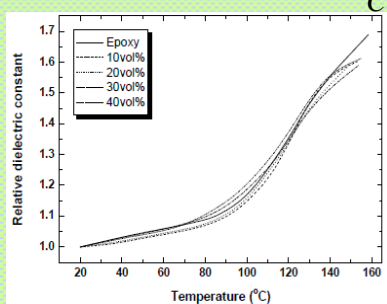
Modificirana Debyeova jednađžba glasi:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rdc} - \epsilon_{r\infty}}{[1 + (j\omega\tau)^\alpha]^\beta}$$

gdje su α i β konstante tipično manje od 1. Njihovim postavljanjem u 1 dobije se klasična Debyeova jednađžba. Ove jednađžbe su korisne u tehnici za predviđanje ϵ_r na bilo kojoj frekvenciji iz poznatih vrijednosti na različitim frekvencijama. Ako je ovisnost o temperaturi (T) poznata onda se može predvidjeti ϵ_r^* na bilo kojoj frekvenciji (ω) i temperaturi.

KONDENZATORI – NAPOMENA O ϵ_r

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$



Relativna dielektrična konstanta nije konstanta, nego ovisi o mnogim čimbenicima. Ovdje je ilustrirana ovisnost o čistoći materijala, vlazi, temperaturi i frekvenciji.

UKUPNA POLARIZACIJA

Materijal	Polarizacija	Statički ϵ_r	Napomena
Ar	Elektronska	1,0005	Van der Waals
Si	Elektronska valentnim elektronnima	11,9	Kovalentna krutina. Polarizacija veze.
NaCl	Ionska	5,9	Krutina s ionskom vezom
CsCl	Ionska	7,2	Krutina s ionskom vezom
H ₂ O	Orijentacijska	80	Dipolarna tekućina
Nitrometan	Orijentacijska	34	Dipolarna tekućina
PVC	Orijentacijska	7	Dipolna orijentacija u krutini

Kada su prisutne elektronska, ionska i orijentacijska (dipolarna) polarizacija, treba ih sve uzeti u obzir:

$$p = \alpha_e E_{lok} + \alpha_i E_{lok} + \alpha_d E_{lok}$$

što je ukupni inducirani dipolni moment.

UKUPNA POLARIZACIJA

Svaki od tih učinaka dodaje linearnost u ukupni dipolni moment. Interfacijalna polarizacija se ne može tako uzeti u obzir, jer se polja na rubovima loše definiraju, a dodirne površine ne mogu se staviti u prosjek. Dodatno, ne može se koristiti aproksimacija jednostavnim lokalnim Lorentzovim poljem kod dipolarnih dielektrika te je proračun dodatno zakompliciran. Drugim riječima, Clausis-Mossottijeva jednadžba ne vrijedi u tom slučaju.

Međutim, ϵ_r pod kombiniranom elektronskom i ionskom polarizacijom može se dobiti iz:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} (N_e \alpha_e + N_i \alpha_i)$$

DIELEKTRIČNA ČVRSTOĆA

U dosadašnjem razmatranju pretpostavljeno je djelovanje slabih električnih polja na dielektrični materijal. Ako jakost električnog polja naraste do određene vrijednosti naglo će se smanjiti otpornost dielektričnog materijala, odnosno doći će do **električnog proboja**. Ovisno o agregatnom stanju dielektričnog materijala različiti su uzroci i posljedice električnog proboja.

Veličina koja opisuje svojstvo dielektričnog materijala u odnosu na električni proboj je **probojni napon** U_{pr} . Probojni napon određenog dielektrika ovisi o obliku uzorka materijala i elektroda te vanjskim uvjetima. Uz probojni napon potrebno je stoga precizno definirati uvjete pri kojima je određen.

Ako je dielektrični materijal izložen djelovanju homogenog električnog polja onda je dielektrična čvrstoća:

$$E_{pr} = \frac{U_{pr}}{d} \left[\frac{kV}{mm} \text{ ili } \frac{MV}{m} \right]$$

Električni proboj u **plinovitom** dielektričnom materijalu pod djelovanjem jakog električnog polja nastaje zbog **udarne ili ionizacije fotonima**.

U jakom električnom polju mogu nabijene čestice (elektroni ili ioni), između dva sudara, dobiti toliki prirast kinetičke energije da pri sudaru s neutralnom molekulom izazovu njenu ionizaciju. Kada energija udarnog elektrona nije dovoljna za ionizaciju neutralna molekula prelazi u **pobuđeno stanje**.

Vraćanje molekule u osnovno stanje praćeno je emisijom fotona koji može izazvati ionizaciju neke druge molekule.

Pri proboju nastaje kanal ioniziranog plina između elektroda; najprije se formira iskra koja pri dovoljno velikom naponu prelazi u električni luk.

Dielektrična čvrstoća plinovitog dielektričnog materijala značajno ovisi o temperaturi i tlaku. Povećanjem tlaka u odnosu na normirani smanjuje se srednja duljina slobodnog puta elektrona pa se povećava dielektrična čvrstoća. Smanjivanjem tlaka u odnosu na normirani smanjuje se dielektrična čvrstoća.

Pri vrlo niskim tlakovima plin je toliko razrijeđen da se smanjuje vjerojatnost ioniziranja molekula pa se dielektrična čvrstoća ponovno povećava. Povećanjem temperature smanjuje se gustoća plina, odnosno povećava se srednja duljina slobodnog puta i smanjuje dielektrična čvrstoća plinovitog dielektričnog materijala.

Na dielektričnu čvrstoću plinovitog dielektrika utječu primjese i vlažnost, a utjecaj frekvencije je slabo izražen.

Plinoviti dielektrici se regeneriraju poslije proboja.

U čistim **tekućim** dielektričnim materijalima električni proboj nastaje udarnom ionizacijom slično kao kod plinovitih dielektrika. Tekući dielektrici imaju veću dielektričnu čvrstoću od plinovitih dielektrika jer je manja duljina srednjeg slobodnog puta elektrona koji vrše ionizaciju.

Realni tekući dielektrični materijali sadrže primjese (vodu, plinove, čvrste čestice) pa dielektrična čvrstoća ovisi o njihovoj količini.

Utjecaj tlaka i temperature na dielektričnu čvrstoću čistih tekućih dielektričnih materijala nema praktični značaj.

Tekući dielektrici se regeneriraju poslije proboja.

Proboj **čvrstih** dielektričnih materijala može nastati kao posljedica:

- **električnog,**
- **elektrotermičkog ili**
- **elektrokemijskog proboja.**

Kod **električnog proboja** čvrstog dielektrika proces je sličan udarnoj ionizaciji u plinovima i tekućinama u kojoj sudjeluju elektroni i šupljine.

Elektrotermički proboj je posljedica zagrijavanja dielektrika zbog dielektričnih gubitaka. To je kumulativni proces jer zagrijavanjem dielektrični gubici rastu. Rijetko se događa.

Elektrokemijski proboj nastaje kad se električna otpornost dielektričnog materijala smanjuje zbog kemijskih promjena izazvanih jakim električnim poljem. U nekim slučajevima jaka električna polja mogu izazvati elektrolizu (razlaganje) materijala, pojavu ozona na površini materijala i sl.

Smanjenje dielektrične čvrstoće pri dugotrajnom djelovanju jakog električnog polja koje izaziva kemijske promjene, naziva se **starenje dielektričnog materijala**.

PODJELE DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Prema brojnosti i širini primjene dielektrični materijali tvore najznačajniju skupinu elektrotehničkih materijala. Moguće su podjele po različitim svojstvima.

Prema ovisnosti vektora polarizacije (ili električnog pomaka) o vektoru jakosti električnog polja dijele se na:

- **linearne** (elektroizolacijski materijali) i
- **nelinearne**.

Po kemijskom sastavu su:

- organski i
- anorganski.

PODJELE DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Prema agregatnom stanju dielektrični materijali su:

- plinoviti,
- tekući ili
- čvrsti.

Po podrijetlu:

- prirodni i
- sintetički (umjetni).

PLINOVITI DIELEKTRIČNI MATERIJALI

Opća svojstva plinovitih dielektričnih materijala u odnosu na tekuće i čvrste dielektrike su:

- ⇒ mala relativna dielektrična konstanta,
- ⇒ velika električna otpornost,
- ⇒ naglašeno mali tangens kuta dielektričnih gubitaka i
- ⇒ mala dielektrična čvrstoća.

Ostala svojstva važna kod primjene plinovitih dielektričnih materijala su:

- ⇒ kemijska inertnost,
- ⇒ stabilnost pod djelovanjem električnog polja,
- ⇒ dobro vođenje topline,
- ⇒ nezapaljivost,
- ⇒ neotrovnost,
- ⇒ niska cijena, itd.

ZRAK

Zrak ima najširu primjenu među plinovitim elektroizolacijskim ili dielektričnim materijalima. Okružuje gotovo sve elektrotehničke uređaje.

Zrak je smjesa plinova dušika (78,08 vol.%), kisika (20,95 vol.%), plemenitih plinova (0,94 vol.%) i nešto vodene pare, ugljičnog dioksida, amonijaka i ozona. U industrijskim područjima zrak sadržava sumporni dioksid, a u nižim slojevima atmosfere i prašinu. Neka svojstva zraka na temperaturi od 20 °C i tlaku od 1013hPa prikazana su u tablici. Na ova svojstva znatnije utječe temperatura, tlak i vlažnost. Ionizirani zrak ima manju električnu otpornost, veće dielektrične gubitke, a može postati i potpuno vodljiv.

ϵ_r	ρ [Ωm]	$\text{tg } \delta$	E_{pr} [MV/m]
1,00059	10^{14}	$4 \cdot 10^{-6}$	3,2

RAZNI PLINOVITI DIELEKTRIČNI MATERIJALI

Heksafluorid sumpora (elektrotehnički plin) SF_6 ima 2,3 puta veću dielektričnu čvrstoću od zraka. Koristi se u hermetički zatvorenim visokonaponskim transformatorima, kabelima i kondenzatorima.

Dikloridfluormetan (**freon**) CCl_2F_2 najviše se koristi kao sredstvo za hlađenje.

Dušik N_2 ima značajnu primjenu kao elektroizolacijski materijal u visokonaponskim kabelima i kondenzatorima. U transformatorima se koristi radi zaštite ulja od oksidacije. Zajedno s argonom rabi se za punjenje žarulja.

Vodik H_2 najviše se koristi kao sredstvo za hlađenje zbog visoke termičke vodljivosti.

Helij He, **neon** Ne, **argon** Ar, **kripton** Kr i **kсенon** Xe uglavnom se upotrebljavaju za punjenje žarulja i cijevi.

TEKUĆI DIELEKTRIČNI MATERIJALI

Od tekućih dielektričnih materijala obično se iziskuje:

- **velika dielektrična čvrstoća,**
- **velika električna otpornost,**
- **mali tangens kuta dielektričnih gubitaka,**
- **dobra kemijska i termička postojanost,**
- **nezapaljivost i**
- **niska cijena.**

Dijele se u tri grupe:

- **mineralna ulja,**
- **sintetički tekući dielektrici i**
- **biljna ulja.**

MINERALNA ULJA

Dobivaju se destilacijom sirove nafte (treća i četvrta frakcija pri temperaturama od 300 °C do 400 °C), rafinacijom, čišćenjem i sušenjem. Po kemijskom sastavu su smjesa različitih zasićenih i nezasićenih ugljikovodika. Veliki im je nedostatak zapaljivost.

Prema primjeni dijele se na:

- transformatorsko,
- kondenzatorsko i
- kabelsko (rijetko i gusto) ulje.

Transformatorsko ulje se koristi u transformatorima kao elektroizolacijsko i rashladno sredstvo. U uljnim prekidačima međusobno izolira vodljive dijelove i gasi električni luk.

MINERALNA ULJA

Kondenzatorsko ulje se upotrebljava za impregniranje papira u kondenzatorima. Poželjna bi bila veća relativna dielektrična konstanta.

Kabelsko ulje se rabi za impregniranje papira za izolaciju visokonaponskih kabela.

Relativna dielektrična konstanta, otpornost i dielektrična čvrstoća nekih tekućih dielektričnih materijala

Materijal	ϵ_r	$\rho / \Omega\text{m}$	E_{pr} / MVm^{-1}
transformatorsko ulje	2,1	$>10^{11}$	>14
triklordifenil	4,5	$3 \cdot 10^9$	20
silikonski dielektrik	2,2 do 2,8	$>10^{12}$	>10

SINTETIČKI TEKUĆI DIELEKTRICI

Zbog nedostataka mineralnih ulja sintetiziran je veći broj umjetnih tekućih dielektrika:

- klorirani,
- silikonski i
- fluorni dielektrični materijali.

Klorirani ugljikovodici dobivaju se od različitih ugljikovodika zamjenom atoma vodika atomima klora.

Opće formula: $\text{C}_{12}\text{H}_{10-n}\text{Cl}_n$ gdje je n od 3 do 6. Klorirani difenili imaju različite proizvođačke nazive: sovol, heksol, piranol, inertin, piralen.

Nezapaljivi su i kemijski stabilni, toksični i znatno skuplji od mineralnih ulja. Koriste se za kondenzatora i transformatora.

SINTETIČKI TEKUĆI DIELEKTRICI

Silikonski tekući dielektrici odlikuju se malim dielektričnim gubicima, malom higroskopnošću i visokom radnom temperaturom (do 200 °C). U sastavu njihovih molekula je atom silicija. Upotrebljavaju se za impregniranje i zalivanje uređaja koji rade na povišenim temperaturama. Visoka cijena ograničava njihovu širu primjenu.

Fluorni tekući dielektrici nastaju spajanjem fluora s organskim spojevima. Imaju male dielektrične gubitke, malu higroskopičnost i visoku termičku stabilnost (do 300 °C). Nezapaljivi su, a termička vodljivost im je znatno veća od mineralnih ulja i silikonskih tekućih dielektrika. Upotrebljavaju se za zalivanje uređaja koji rade na povišenim temperaturama. Širu primjenu ograničava visoka cijena.

BILJNA ULJA

Ricinusovo ulje se rabi za impregniranje nekih vrsta papira (dielektrici kondenzatora) i kao sastavni dio nekih vrsta voskova i lakova.

Sušiva ulja nakon određenog vremena iz tekućeg prelaze u čvrsto stanje. Najznačajniji iz ove grupe tekućih dielektričnih materijala su laneno i kinesko drveno ulje. Sušiva ulja su sastavni dio sintetičkih lakova.

ČVRSTI DIELEKTRIČNI MATERIJALI

Anorganski:

- tinjac,
- azbest,
- kremen,
- staklo,
- keramički materijali,
- tanki slojevi.

Organski:

- voskovi,
- bitumen i asfalt,
- smole,
- silikonske smole,
- kaučuk i guma,
- vlaknasti i tekstilni elektroizolacijski materijali,
- elektroizolacijski lakovi,
- zalivne mase,
- kitovi.

Anorganski čvrsti dielektrični materijali

Tinjac (liskun) je mineral koji se sastoji od kalijevog, magnezijevog i aluminijevog silikata. U prirodi se nalazi u obliku silikata koji se lako kala u tanke listiće. Zbog ručne prerade tinjac je skup. Ovisno o kemijskom sastavu postoji više vrsta tinjca, ali se u elektrotehnici koriste samo dvije vrste:

- muskovit i
- flogopit.

Muskovit je kalijski alumosilikat, proziran, malih dielektričnih gubitaka, dobre termičke vodljivosti, male higroskopičnosti i visoke mehaničke i dielektrične čvrstoće.

Na temperaturama od 600 °C do 800 °C omekšava pa gubi električna i mehanička svojstva.

Anorganski čvrsti dielektrični materijali

Flogopit je kalij-magnezij-alumosilikat lošijih električnih i mehaničkih svojstava od muskovita, ali podnosi više temperature (900 - 1000 °C).

Tinjac se u prirodnom obliku koristi za elektroizolaciju kod električnih strojeva, mjernih instrumenata, elektroničkih komponenti (elemenata) i kao dielektrik za kondenzatore (naročito promjenjive).

Veći broj izolacijskih materijala proizvodi se miješanjem tinjca u obliku listića ili praha s odgovarajućim vezivima - mikaproducti: mikanit, mikaleks, itd.

Azbest je naziv za grupu minerala vlaknaste strukture.

Nema dobra elektroizolacijska svojstva pa se ne primjenjuje kod visokonaponskih i visokofrekvencijskih uređaja.

Osnovna prednost azbesta je visoka temperaturna stabilnost, slabo vođenje topline i **nesagorivost** (temperatura topljenja je 1150 °C) pa je vrlo otporan na djelovanje električnog luka.

U elektrotehnici se koristi:

- azbestno brašno za kitove i punjenje rastalnih uložaka osigurača,
- azbestno predivo, konac, trake i ploče za izoliranje,
- azbestni cement za ploče, cijevi i druge elemente,
- kao izolacija od vatre, vatrogasna odjela, itd.

Uzrokuje azbestozu, koja može biti:

- okolišna (izloženost vlaknima azbesta u okolini tvornica ili od azbestnih proizvoda) i
- profesionalna (profesionalna izloženost vlaknima azbesta, u azbestnoj industriji ili protupožarnoj zaštiti i sl.).

Azbestoza je naziv za grupu simptoma koji vode na otežano disanje i smanjeni plućni kapacitet.

Azbestna vlakna nadražuju plućne anveole tako da je stimuliran nastanak i razvoj raka pluća i/ili poplućnice.

ILO klasifikacija označava stupanj oštećenosti pluća.

Osim histopatološkog nalaza, koji je neugodan i težak, jedina dijagnostika je iz rendgenograma pluća.



Relativna dielektrična konstanta, otpornost i dielektrična čvrstoća nekih čvrstih dielektričnih materijala

Materijal	ϵ_r	$\rho / \Omega\text{m}$	E_{pr} / MVm^{-1}
muskovit	5,5 - 7,5	$>10^{13}$	25 - 70
kremen	3,7	$>10^{15}$	>25
borosilikatna stakla	4 - 6,5	$>10^8$	10
parafin	2,1 - 2,2	$10^{13} - 10^{15}$	>18
bitumen	2,5 - 3	$>10^{13}$	10 - 15
šelak	5	$>10^{12}$	>20
epoksidna smola	3,9	10^{11}	>16
polietilen-tereftalat	3,3	$>10^{14}$	>300
PVC	3 - 4,5	$<10^{12}$	26 - 28
polietilen	2,1 - 2,4	10^{15}	45 - 60
silikonska smola	3 - 4	$10^{12} - 10^{14}$	15 - 25
meka guma	3 - 7	$>10^{13}$	20 - 50
kaučuk	2,5 - 3	$>10^{13}$	>35
papir	1,5 - 2,5	$>10^{13}$	>8

Kremen (kvarc) je kristal silicijevog dioksida SiO_2 . U elektrotehnici se kao dielektrik u kondenzatorima, za izradu šipki, cijevi (kvarcne svjetiljke) i ploča koristi **kvarcno staklo** koje nastaje taljenjem kremenca ili kremenog pijeska. U poluvodičkoj tehnologiji silicijev dioksid služi za izolaciju i pasivizaciju površina. Koristi se u piezoelektričnim primjenama.

Staklo je skupni naziv za anorganske prozirne krutine amorfne strukture. Dobivaju se taljenjem kremenca SiO_2 s raznim dodacima.

Natrijeva i kalijeva stakla se ne rabe kao elektroizolatori zbog relativno visoke električne provodnosti naročito pri višim temperaturama. Ova stakla se u elektrotehnici koriste pri izradi sijalica, neonskih i elektronskih cijevi i sl.

Od **borosilikatnih stakala** izrađuju se niskonaponski izolatori. Značajan proizvod od borosilikatnog stakla su staklena vlakna. Praktično su nezapaljiva, a koriste se za elektroizolaciju u obliku prediva, traka i tkanine te za armiranje drugih izolacijskih materijala.

Keramički materijali se dobivaju od smjese minerala ili metalnih oksida sinter-postupkom (prešanje i zagrijavanje). Vrlo su brojna skupina materijala, a elektroizolacijski se dijele na podgrupe:

- ❖ porculani,
- ❖ steatiti,
- ❖ rutili,
- ❖ keramike s malim koeficijentom linearnog širenja,
- ❖ porozne keramike,
- ❖ oksidne keramike,
- ❖ vatrostalne keramike.

U tehnici su najvažnije tzv. **tehničke keramike**. Na temelju sastava, razlikuju se dvije vrste tehničkih keramika:

- oksidne (npr. Al_2O_3 , ZrO_2 , Al_2TiO_5 , MgO , BaTiO_3 , ThO_2 , $\text{ZrO}_2 \times \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{ZrO}_2$)
- neoksidne (npr. SiC , Si_3N_4 , B_4C , $\text{Si}_{6-x}\text{Al}_x\text{N}_{8-x}\text{O}_x$, BN , WC , TiN , TiC , AlN , umjetni dijamant).

Tehničke keramike odlikuju se dobrom tvrdoćom i otpornošću na trošenje pa su pogodne za izradu strojeva s velikim trenjem.

Podnose vrlo visoke temperature kroz dulje razdoblje te imaju nižu toplinsku i električnu provodljivost.

Dobre su kemijske postojanosti i manje su gustoće.

Tehnička keramika upotrebljava se i u funkcionalne svrhe:

- za izradu senzora u industriji,
- za aktuatore,
- za dijelove računala,
- za visokotemperaturne otpornike, itd.

Podjele keramika:

- visokotemperaturni **supravodiči**
- **vodiči**
 - komponente koje se zagrijevaju na visoke temperature
 - omski otpornici • varistori
 - termistori • baterije
 - kemijski senzori • senzori vlage
- **poluvodiči**
- **izolatori**
 - kondenzatori s malom permitivnošću
 - kondenzatori sa srednjom permitivnošću
 - kondenzatori s visokom permitivnošću
- **piezoelektrici**
- **pirelektrici**
 - infracrvena detekcija
 - radiometrija
 - kontrola zagađenja
 - alarm za uljeze
 - termičko oslikavanje
- **elektrooptičke komponente**
- **magnetske komponente**

Porculani se sastoje od kaolina, kremenca (kvarca) i glinenca (feldspata).

Za izradu elektroizolatora upotrebljava se tvrdi porculan s više od 50% kaolina.

Površina mu se redovito glazira.

Posebno je otporan prema klimatskim utjecajima, negorljiv je i lako se oblikuje (promjena dimenzija oko 20% pri pečenju). Nedostaci porculana su krhkost (teško se mehanički obrađuje) i mala otpornost na udarno opterećenje.

Steatiti su keramički materijali kod kojih je dominantan udio magnezijevog silikata.

Svojsva su slična kao kod tvrdog porculana uz nešto manji tg δ i manje skupljanje pri sinter-postupku.

Od steatita se izrađuju nisko i visokonaponski izolatori, potporni izolatori, antenski izolatori, dijelovi utičnica, prekidača, sklopki, osigurača, elektrotermičkih uređaja (štednjaci, glačala, grijači i sl.), tijela niskofrekvencijskih zavojnica i kondenzatorskih elemenata.

Rutili su skupina keramika od magnezijevog silikata i metalnih oksida (najčešće titanov dioksid TiO_2 - rutil).

Imaju veliku relativnu dielektričnu konstantu ϵ_r (50 Hz do 1 MHz) od 5,5 do 100.

Uglavnom se koriste kao dielektrici u kondenzatorima i za izradu keramičkih otpornika.

Keramike s malim koeficijentom linearnog širenja imaju ovaj koeficijent približno 4 puta manji od porculana i 6 do 9 puta manji od steatita.

Koriste se u elektrotermičkim uređajima.

Porozne keramike odlikuju se velikom električnom otpornošću i na visokim temperaturama.

Primjenjuju se u elektrotermičkim uređajima i kod elektronskih cijevi.

Oksidna keramika ima bolja **vatrostalna** svojstva, veću termičku vodljivost i bolja mehanička i električna svojstva od porculana. Koristi se za elektroizolaciju kod termoelemenata i svjećica za benzinske motore.

Od vatrostalne keramike izrađuju se elektroizolatori za vrlo visoke temperature.

Tanki slojevi su najčešće oksidi ili spojevi s fluorom različitih elemenata.

Koriste se kao dielektrici kondenzatora i integriranih elemenata i kao elektroizolacijski slojevi.

Imaju dobra električna i mehanička svojstva.

Iznosi karakterističnih veličina za neke tanke slojeve

Tanki sloj	ϵ_r	E_{pr} / MVm^{-1}
Al_2O_3	7,9 do 10	400 do 800
Ta_2O_5	21 do 50	400 do 500
SiO_2	4 do 4,2	350

Organski čvrsti dielektrični materijali

Voskovi su organski materijali vrlo složenog kemijskog sastava. Imaju:

- malu mehaničku čvrstoću,
- nisko talište i
- malu higroskopičnost.

Voskovi su lako zapaljivi.

U elektrotehnici se za impregniranje i kao zalivna masa primjenjuju:

parafin,
vazelin,
cerezin,
halovaks,
oleovaks i
sintetički parafin i cerezin.

Organski čvrsti dielektrični materijali

Parafin se dobiva destilacijom nafte, ugljena ili parafinskih škriljevaca. Bijele je boje, ima nisko talište (od 50 do 55 °C), ne otapa se u vodi ili alkoholu (otapa se u benzinu, benzolu i drugim tekućim ugljikovodicima) i najjeftiniji je vosak.

Parafin se najviše rabi za impregniranje papira, tkanina, drvenih dijelova i zalivanje kondenzatora, malih transformatora i svitaka.

Unatoč izvrsnih elektroizolacijskih svojstava parafin ima ograničenu primjenu u elektrotehnici zbog niskog tališta i zapaljivosti.

Vazelin je polutvrda smjesa tekućih i krutih ugljikovodika. Dobiva se destilacijom nafte.

Cerezin nastaje čišćenjem zemnog voska ozokerita.

Ima bolja električna svojstva od parafina i više talište (70 do 80 °C) pa ga u mnogim primjenama, unatoč višoj cijeni, zamjenjuje.

Sintetički parafin, sintetički cerezin, halovaks i oleovaks imaju svojstva slična prirodnim voskovima.

Sintetički parafin i sintetički cerezin imaju više talište (100 do 130 °C) nego prirodni.

Halovaks je žutozelene boje, ima relativnu dielektričnu konstantu $\epsilon_r \approx 5$, ne gori, ne oksidira i talište mu je 90 do 130°C.

Dielektrični gubici mu naglo rastu s porastom temperature, ima manju dielektričnu čvrstoću od prirodnih voskova i pare su mu toksične.

Halovaks se najviše koristi za impregniranje papirnih kondenzatora.

Oleovaks se proizvodi hidrogenizacijom ricinusovog ulja pri povišenoj temperaturi i tlaku.

Ne otapa se u organskim otapalima, a talište mu je oko 85 °C.

Bijele je do svijetložute boje.

Visoka relativna dielektrična konstanta ϵ_r (od 15 do 35) i veliki dielektrični gubici znatno ovise o temperaturi i frekvenciji.

Bitumen i asfalt su amorfni materijali, crne boje koji su složena smjesa različitih ugljikovodika.

Bitumeni se dobivaju od teških sastojaka pri destilaciji nafte, a asfalti su prirodni bitumeni fosilnog podrijetla. Bitumeni se otapaju u ugljikovodicima, a *netopljivi su u vodi i alkoholu*. Nisu higroskopični i praktično ne propuštaju vodu.

Pri niskim temperaturama su jako krhki. Temperatura omekšavanja bitumena je od 50 do 140 °C, a asfalta do 220 °C.

Bitumeni se koriste kao komponente pri izradi izolacijskih lakova i kao zalivna masa vodiča, kondenzatora, električnih strojeva i drugih uređaja.



Smole

Smole su brojna skupina organskih materijala, najčešće amorfne strukture s posebnim kemijskim i fizikalnim svojstvima. Uobičajeno se sastoje od vrlo velikih molekula (makromolekule, polimerni lanci).

Najviše radne temperature smola koje se rabe u elektrotehnici su od 70 do 130 °C. Na sobnoj temperaturi to su čvrsti materijali. Otapaju se samo u organskim otapalima.

Zbog male higroskopičnosti i dobrih elektroizolacijskih svojstava smole imaju široku primjenu u elektrotehnici, a upotrebljavaju se i kao komponente za izradu elektroizolacijskih lakova, masa za zalivanje, plastičnih masa, vlaknastih materijala, itd.

Smole

Po podrijetlu smole se dijele na:

- prirodne i
- sintetičke (umjetne).

Prirodne smole su materijali biljnog ili životinjskog podrijetla, a u elektrotehnici se upotrebljavaju:

- šelak,
- kolofonij,
- kopali i
- jantar.

Sintetičke smole nastaju kemijskim reakcijama u kojima se jednostavnije molekule monomera spajaju u složene makromolekule polimera.

Prema načinu nastajanja i vrsti polaznih materijala sintetičke se smole dijele na:

- polimerizacijske i
- polikondenzacijske.

Polimerizacija je takva kemijska reakcija u kojoj se od mnoštva jednostavnijih, istovrsnih molekula, u prisutnosti katalizatora, pri određenoj temperaturi i tlaku dobiva polimer.

Polikondenzacija je postupak dobivanja polimera iz različitih monomernih molekula.

Polimeri dobiveni polikondenzacijom imaju slabija elektroizolacijska svojstva i veću higroskopičnost od polimera dobivenih polimerizacijom.

Prirodne smole

Šelak među prirodnim smolama ima najveću primjenu u elektrotehnici. Pojavljuje se na kori određenih vrsta tropskih biljaka. Poslije čišćenja je lomljiv i ima žutocrvenu boju.

Šelak se dobro otapa u alkoholu, djelomično u acetonu.

Pri 50 do 60°C omekšava; tali se na oko 300 °C.

Porastom temperature dielektrični gubici naglo rastu.

Najčešće se koristi kao sredstvo za impregnaciju i elektroizolaciju.

Kolofonij se dobiva destilacijom tekućih dijelova smole crnogoričnog drveća. Najjeftinija je prirodna smola, žute je boje, otapa se u alkoholu, benzinu, benzolu, mineralnim i biljnim uljima.

Omekšava na temperaturama od 50 do 70 °C.

Dielektrični gubici znatno rastu pri porastu temperature.

Kolofonij se koristi kao komponenta za izradu lakova i masa za zalivanje. Upotrebljava se za impregniranje papira u energetskim kabelima.

Prirodne smole

Kopali se dobivaju iz tekućih dijelova smole nekih biljaka. Imaju veću mehaničku čvrstoću i višu temperaturu omekšavanja od kolofonija.

Koriste se za izradu elektroizolacijskih lakova.

Jantar je fosilna smola svijetložute boje. Otapa se u benzinu i mineralnim uljima. Visoke je cijene.

Koristi se u mjernim uređajima kod kojih je potrebna velika električna otpornost izolacije ($\rho = 10^{17} \Omega \text{ m}$).

Sintetičke smole

Uobičajena je podjela sintetičkih smola na **termostabilne** (duroplasti) i **termoplastične** (termoplasti).

Termostabilne smole se pri zagrijavanju stvrdnjavaju. Na kraju postaju netopljivi i netaljivi.

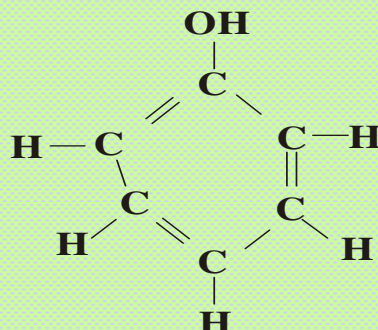
Termoplastične smole pri zagrijavanju najprije omekšaju, postaju plastične i lako se oblikuju. Otapaju se u odgovarajućim otapalima. Nakon hlađenja zadržavaju termoplastična svojstva.

Iz skupine termostabilnih sintetičkih smola u elektrotehnici značajniju primjenu imaju:

- fenolformaldehidne,
- anilinformaldehidne,
- ureaformaldehidne,
- melaminformaldehidne,
- poliesterske i
- epoksidne smole.

Fenolformaldehidne smole nastaju **polikondenzacijom fenola** $\text{H}_5\text{C}_6\text{-OH}$ s **formaldehidom** H_2CO . Od većeg broja ovih smola u elektrotehnici se primjenjuju novolak i rezolne smole.

Fenol:



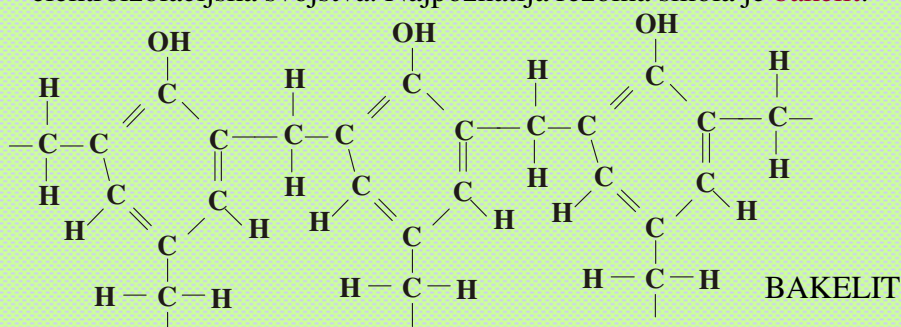
Novolak je termoplastična smola, tali se na 100 do 120°C. Otapa se u alkoholu, acetonu i drugim organskim otapalima. Otopljena u alkoholu naziva se **bakelit-lak**. Novolak se koristi pri izradi plastičnih masa.

Rezolne smole mogu biti termoplastične ili termostabilne.

Prema načinu proizvodnje i termičkoj obradi rezolne smole mogu biti u A, B i C stanju.

Rezol je rezolna smola u stanju A. To je gusta žilava masa koja omekšava pri 50 do 70°C i otapa se u acetonu, alkoholu i drugim alkalnim vodenim otopinama. Daljnim zagrijavanjem rezol prelazi u rezitol (stanje B).

U ovom stanju smola je netopiva i teško se tali pri 110 do 120°C. Stanje C je rezit koji ima veliku mehaničku čvrstoću i dobra elektroizolacijska svojstva. Najpoznatija rezolna smola je **bakelit**.



Rezolne smole se rabe za izradu elektroizolacijskih lakova, masa za zalivanje i ljepila, za impregnaciju papira i tkanina pri proizvodnji slojnih elektroizolacijskih materijala.

Nedostatak:

- mala otpornost na stvaranje površinskih vodljivih staza i
- povećana higroskopičnost.

Anilinformaldehidne smole nastaju polikondenzacijom anilina $\text{H}_5\text{C}_6\text{-NH}_2$ s formaldehidom.

Mogu biti termostabilne ili termoplastične.

Otapaju se u benzolu, acetonu, kerozinu, itd.

Nedostatak ovih smola je niska radna temperatura.

Zbog malih dielektričnih gubitaka koriste se u visokofrekvencijskoj tehnici i kao komponenta pri proizvodnji slojnih elektroizolacijskih materijala s papirom.

Ureaformaldehidne smole (karbamidi) se dobivaju polikondenzacijom karbamida $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ s formaldehidom. Dobro svojstvo ovih smola je velika otpornost stvaranju površinskih vodljivih staza i otpornost na električni luk. Karbamidne smole koriste se u uređajima izloženim djelovanju električnog luka i za elektroizolacije od kojih se ne zahtijeva visoka radna temperatura (do $76\text{ }^\circ\text{C}$). Rabe se i za izradu zalivnih masa i slojnih elektroizolacija.

Melaminformaldehidne smole nastaju polikondenzacijom melamina $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$ i formaldehida. U odnosu na karbamidne imaju veću mehaničku čvrstoću, veću radnu temperaturu, manju higroskopičnost i veću otpornost prema stvaranju površinskih vodljivih staza. Velika otpornost na djelovanje električnog luka posljedica je izlučivanja plinova (dušik, vodik i dr.) koji intenzivno gase luk. Koriste se u uređajima kod kojih se javlja električni luk, za izradu lakova i slojnih elektroizolacijskih materijala.

Poliesterske smole su organske smole koje nastaju polikondenzacijom viševalentnih alkohola (etilglikol, propilenglikol, glicerol) i različitih karbonskih kiselina (ftalna i tereftalna kiselina).

Mogu biti zasićene i nezasićene, a prema ponašanju pri zagrijavanju **termostabilne i termoplastične**.

Neke termostabilne poliesterske smole (na primjer gliceroftalna smola) rabe se za izradu vezivnih lakova za lijepljenje tinjca, azbesta i drugih slojnih anorganskih elektroizolacijskih materijala.

Epoksidne smole se dobivaju **poliadicijom** viševalentnih fenola i njihovih derivata s epiklorhidrinom.

Poliadicija se od polikondenzacije razlikuje u tome što pri spajanju monomera u polimer ne nastaju sporedni produkti.

Epoksidne smole se otapaju u acetonu i touolu, djelomično se otapaju u alkoholu, a ne otapaju se u vodi i benzinu. Epoksidne smole imaju malu higroskopičnost, dobra elektroizolacijska svojstva, mali koeficijent skupljanja pri očvršćivanju i mali koeficijent linearnog širenja. Zato se ove smole najviše koriste kao zalivne mase i pri proizvodnji elektroizolacijskih lakova. Epoksidne smole se upotrebljavaju i kao visokokvalitetna vezivna sredstva, jer imaju jaku adheziju prema brojnim organskim i anorganskim izolacijskim materijalima.

U elektrotehnici primjenu nalaze i termoplastične sintetičke smole:

- | | |
|--------------------|-------------------------|
| - poliamidi, | - polietilentereftalat, |
| - polivinilklorid, | - polietilen, |
| - polistiren, | - poliakrilati, |
| - fluorne smole i | - poliuretani. |

Poliamidi se dobivaju polikondenzacijom diamina i dikarbonskih kiselina.

Zajedničke osobine su im velika žilavost i vlačna čvrstoća i otpornost na trošenje (habanje). Za razliku od ostalih termoplasta poliamidi pri povišenoj temperaturi (190 do 250 °C) ne omekšavaju postepeno već prelaze u tekuće stanje.

Hlađenjem naglo prelaze u čvrsto stanje.

Poliamidi se otapaju u fenolima i amidima.

Od velikog broja različitih vrsta poliamida najpoznatije su **najlon i kapron**.

Nedostatak poliamida je velika higroskopičnost. Najviše se koriste za: izradu dijelova elektroničkih uređaja i mehanički vrlo otpornih lakova za žice, pri proizvodnji slojnih elektroizolacijskih materijala, a poliamidna vlakna za omatanje kabela. Folije ovih polimera rabe se za izolaciju malih motora i za izradu složenih slojnih elektroizolacijskih materijala.

Polietilentereftalat nastaje polikondenzacijom etilenglikola i tereftalatne kiseline.

To je termoplastični poliester i često se naziva i ester tereftalatne kiseline.

Otapa se u fenolima i trifluorocenoj kiselini.

Odlikuje se dobrim mehaničkim i električnim svojstvima i temperaturnom postojanošću do 150 ili 160 °C (topi se na 265°C).

Polietilentereftalat se izrađuje u obliku vlakana (**terilen, dakron**) i folija (**mylor, melnex, hastaphan**). Od vlakana se izrađuju poliesterske tkanine koje se impregnirane koriste za izolaciju namotaja električnih strojeva. Dielektričnu čvrstoću folija od polietilentereftalata koja dostiže vrijednosti i preko 500 MV/m (max vrijednost diel. čvrst. elektroizol. materijala). Poliesterske folije se mogu lako metalizirati u vakuumu. Rabe se kao dielektrik kondenzatora, za izoliranje malih motora, kao osnova za izradu magnetskih traka i izoliranje kabela.

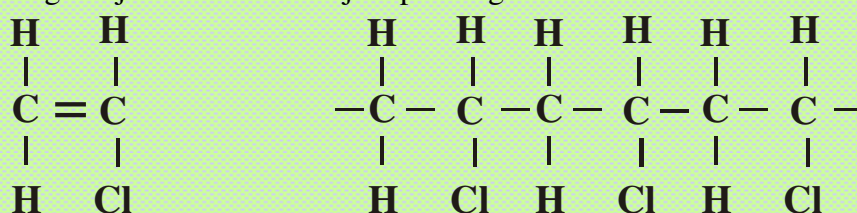
Polivinilklorid (PVC) je termoplastični polimer amorfne strukture.

Dobiva se emulzijskim i suspenzijskim postupcima polimerizacije plinovitog monomera vinilklorida C_2H_3Cl . Otporan je na djelovanje vode, razblaženih kiselina, lužina, ulja, benzina i alkohola, a otapa se u dikloretanu, klorbenzolu, dioksanu, metilenkloridu, itd.

Slabo upija vodu i vlagu.

Temperatura omekšavanja PVC-a je 75 do 80 °C, pri višim temperaturama gori, ali ne potpomaže gorenje.

Pri gorenju PVC-a se razvija toplina i gusti dim.



VINILKLORID

POLIVINILKLORID

PVC se izrađuje u obliku tvrde smole (**tvrdi PVC**) koji sadrži razne stabilizatore i punila (trgovački nazivi su: vinidur, izodur, juvidur, viniplast, itd.).

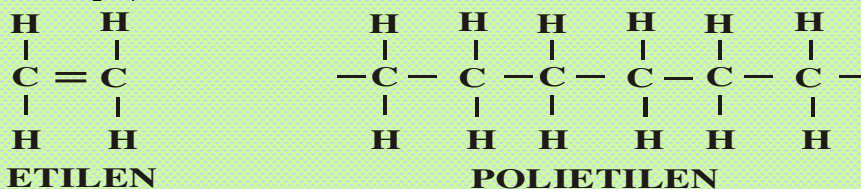
Dodavanjem omekšivača tvrdom PVC-u dobiva se **meki PVC** koji može biti vrlo različitih svojstava. Radne temperature PVC-a su od -50 °C do +90 °C.

Iako nema naglašeno dobra elektroizolacijska svojstva ipak je jedan od najčešće upotrebljanih izolacijskih materijala u elektrotehnici.

Meki PVC se rabi za vanjsku izolaciju vodiča i kabela jer je otporan na koroziju. Od PVC-a se izrađuju ploče, folije, trake, vlakna, cijevi, itd. Upotrebljava se za izradu ljepljivih elektroizolacijskih traka, izolacijskih navlaka i elektroizolacijskih lakova.

Tvrđi PVC se koristi kao konstrukcijski materijal za izradu kućišta, navlaka, kabelaških kanala i sl.

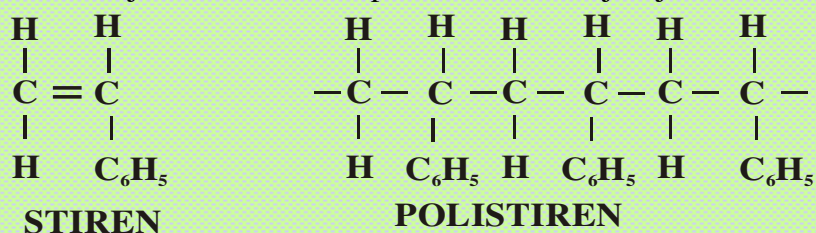
Polietilen je termoplastična smola dobivena polimerizacijom tekućeg etilena C_2H_4 .



Ovisno o postupku proizvodnje razlikuju se visokotlačni, srednjotlačni i niskotlačni polietilen. Zajednička svojstva svih polietilena su prozirnost, slabo propuštanje vode, dobro propuštanje kisika i drugih plinova, otpornost prema običnim otapalima i kemijskim utjecajima. Osjetljiv je na utjecaj ozona i halogenih elemenata, na toplinsku i fotooksidaciju. Temperatura omekšavanja polietilena je od 105 do 130°C. Zbog odličnih elektroizolacijskih svojstava i malih dielektričnih gubitaka polietilen se često primjenjuje u elektrotehnici posebno za izradu dijelova visokofrekvencijskih uređaja, za izolaciju i kao vanjski plašt visokonaponskih i visokofrekvencijskih kabela i vodiča.

Polistiren (polistirol) je termoplastična smola koja se dobiva polimerizacijom nezasićenog ugljikovodika stirena (stirola) C_8H_8 . Polistiren je bezbojan, nije higroskopičan, odličnih je elektroizolacijskih svojstava, lako se oblikuje i niske je cijene. Ne otapa se u vodi, alkoholu, uljima, kiselinama i slabim lužinama, a otapaju ga tekući ugljikovodici. Nedostatak polistirena je niska temperatura omekšavanja oko 80 °C. Polistiren se proizvodi u obliku zalivnih masa, lakova, vlakana, folija (stirofleks) debljine 10 do 150 μm i spužvastih masa (stiropor).

Folije od polistirena rabe se kao dielektrik u kondenzatorima i za elektroizolaciju vodiča i kabela. Vlaknasti polistiren koristi se za elektroizolaciju vodiča i kabela posebno u televizijskoj tehnici.



Poliakrilati (akrilne smole) nastaju polimerizacijom akrilne i metakrilne kiseline i njihovih estera. To su termoplastične bezbojne smole, otapaju se u kloriranim ugljikovodicima, a ne otapaju se u vodi, alogatskim ugljikovodicima i u alkoholu.

Dobro se mehanički obrađuju, imaju dobra elektroizolacijska svojstva, malu higroskopičnost i veliku otpornost na stvaranje površinskih vodljivih staza. Najznačajnija smola iz ove skupine je **polimetilmetakrilat** poznatija pod nazivom **pleksiglas ili organsko staklo**.

Zbog dobrih mehaničkih svojstava pleksiglas se u elektrotehnici koristi kao konstrukcijski materijal (ploče, cijevi, šipke, prešani masivni komadi). Pri djelovanju električnog luka iz pleksiglasa se oslobađa veća količina plinova (ugljični monoksid i dioksid, vodik i dr.) koji pridonose gašenju luka. Zato služi za izradu dijelova niskonaponskih prekidača.

Fluorne smole (fluoroplasti) su organski polimeri u čijem sastavu je fluor što im daje izuzetnu kemijsku i temperaturnu postojanost. Od fluornih smola najznačajniju primjenu u elektrotehnici ima politetrafluoretilen i politrifluorkloretilen. Politetrafluoretilen (PTFE) se dobiva polimerizacijom tetrafluoretilena C_2F_4 , a poznatiji su trgovački nazivi **teflon**, fluon, ftoroplast-4, itd.

Teflon je izuzetno kemijski stabilan, na njega ne djeluju kiseline, lužine ni poznata otapala. Na teflon utječu otopljeni alkalni metali i njihovi kompleksni spojevi s amonijakom, naftalinom i piridinom te trifluorni klor i elementarni fluor na povišenim temperaturama. Produkti razlaganja teflona su **toksični**. Struktura teflona se narušava na temperaturi od oko 327 °C i on prelazi u viskoelastično stanje (razlaže se na oko 415 °C).

Teflon nije higroskopičan i temperaturno je stabilan od -100 do +250 °C.



Izuzetno dobra električna svojstva praktično ne ovise o frekvenciji od 50 Hz do 10^{10} Hz ni o temperaturi do 200 °C. Teflon se koristi za izradu elektroizolacijskih dijelova elektro i radiouređaja. U obliku folija rabi se za izoliranje vodiča, kabela i malih električnih strojeva. Teflonske folije se upotrebljavaju i kao dielektrik kondenzatora.

Politrifluorkloretilen se dobiva polimerizacijom trifluorkloretilena C_2F_3Cl , a poznatiji su trgovački nazivi hostaflon i ftoroplast-3. Ima slična elektroizolacijska svojstva kao i teflon, ali je elastičniji i manje temperaturne stabilnosti (do 155 °C) od teflona. U elektrotehnici se rabi za elektroizolaciju kabela i vodiča.

Poliuretani su polimeri koji nastaju poliadicijom izocianata s nositeljima hidroksilnih skupina. Tope se pri 185 °C. Po mehaničkim i električnim svojstvima slični su poliamidima, ali su od njih manje higroskopični. Zbog velike adhezije prema metalima koriste se u obliku masa za lijevanje i prešanje, a zbog otpornosti na djelovanje vlage za plašteve kabela.

KOMENTAR

Lančasti ugljikovodici - npr. PVC

Prestenasti ugljikovodici - npr. Fenol

Arome - aromatski ugljikovodici - oblik prstena

Silikonske smole

Razvijene su s nakanom da se dobra električna svojstva organskih polimera zadrže i na povišenim temperaturama. Silikonske smole se dobivaju hidrolizom organoklorsilana kao i drugim složenim kemijskim postupcima.

Silikonske smole mogu biti termoplastične ili termostabilne.

Prve se dobro otapaju u različitim organskim otapalima.

Visoke se termičke postojanosti do 220 °C, otporne su na niske temperature do -100 °C; imaju malu higroskopičnost i elastičnost. Mogu se proizvesti u obliku ulja, pasta, lakova, itd. Od njih se izrađuju svi elektroizolacijski materijali kao i od organskih polimernih smola.

Razrijeđene organskim otapalima se, zajedno sa staklenim vlaknima, tincem, azbestom i sl, koriste za izradu složenih elektroizolacijskih materijala.

Silikonske smole

Poznati proizvod je silikonski kaučuk (elastomer), odnosno **silikonska guma**.

Mehanička i električna svojstva **silikonske gume** praktično se ne mijenjaju s temperaturom od -60 do +250 °C.

Na silikonsku gumu ne djeluju voda, ozon, svjetlo, razna otapala, oksidacija, itd.

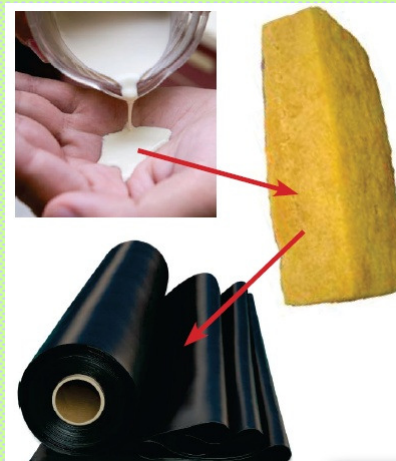
Male je mehaničke čvrstoće i slabe otpornosti prema trošenju. Koristi se za izradu složenih izolacijskih materijala, izolaciju vodiča i kabela.

Vrlo je otporna prema stvaranju korone pa se rabi i kao visokonaponski izolator. Nedostatak je visoka cijena.

Kaučuk i guma

Prirodni kaučuk je ugljikovodik C_4H_7 koji se dobiva preradom mliječnog soka (lateks) nekih vrsta tropskih biljaka (kaučukovac). Čisti kaučuk se ne primjenjuje u elektrotehnici jer je na temperaturama nižim od $10\text{ }^\circ\text{C}$ krhak i lomljiv, a iznad $50\text{ }^\circ\text{C}$ je premekan i ljepljiv. Od njega se proizvode kvalitetni elektroizolacijski lakovi.

Termičkom obradom i dodavanjem sumpora (vulkanizacija) od kaučuka se dobivaju gume.



Kaučuk i guma

Meka guma (sadrži 1 do 3 % sumpora) je vrlo rastegljiva i elastična. Meka guma se upotrebljava za elektroizolaciju vodiča i kabela, za ispunu kabela i vanjske plašteve kabela. Od meke gume se izrađuju izolacijske podloge, gumene rukavice i sl. Nedostatak meke gume je što djelovanjem svjetlosti, topline i kisika "stari", odnosno smanjuje joj se elastičnost, čvrstoća i električna otpornost.

Tvrda guma (sadrži 30 do 35 % sumpora) poznata pod nazivom ebonit proizvodi se u obliku ploča, šipki i cijevi. Od tvrde gume se izrađuju različiti elektroizolacijski dijelovi.

Poluvodljiva guma se dobiva miješanjem kaučuka s grafitom ili većom količinom čađe. Električna otpornost poluvodljive gume je, ovisno o punilu, od $1 \Omega\text{m}$ do $10^8 \Omega\text{m}$.

Poluvodljiva guma se koristi kao antistatički elektroizolacijski materijal.

Sintetički kaučuk potpuno zamjenjuje prirodni, a po nekim svojstvima je i bolji; stabilniji je pri povišenim temperaturama, manje je higroskopičan, otporniji je na djelovanje benzina i ulja, itd. Postoji više vrsta sintetičkog kaučuka, a u elektrotehnici se najčešće primjenjuje **etilen-propilen, butil, kloropren, stiren-butidien i silikon kaučuk**.

Sintetički kaučuk se koristi za elektroizolaciju vodiča i energetskih kabela, izradu složenih slojnih elektroizolacija, vanjske plašteve kabela, izradu masa za zalivanje, izradu elektroizolacijskih dijelova prekidača, utikača i sl. Silikon kaučuk ima povećano radno područje od -65 do $+250$ °C.

Vlaknasti elektroizolacijski materijali

Ti materijali imaju dobra mehanička svojstva, lako se obrađuju i kombiniraju s drugim tekućim ili krutim elektroizolacijskim materijalima. Nedostaci čistih vlaknastih materijala su mala dielektrična čvrstoća, mala termička vodljivost, velika higroskopičnost i poroznost.

Najviše korišteni vlaknasti materijali u elektrotehnici su:

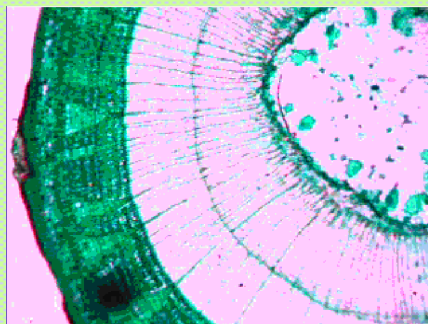
- drvo,
- papir,
- prešpan,
- tkanine i dr.

Drvo je zbog rasprostranjenosti, lake mehaničke obrade i niske cijene jedan od najstarijih elektroizolacijskih materijala. Drvo je organski vlaknasti materijal koji se sastoji od celuloze (40 do 60 %), lignina (20 do 30 %) i drugih sastojaka (smola, tanin, kamfor, ulja, šećer, itd.). Primjena drva u elektrotehnici je ograničena zbog velike higroskopičnosti, nehomogenosti svojstava i zapaljivosti.

Elektroizolacijska svojstva drva se poboljšavaju impregnacijom parafinom, lanenim i transformatorskim uljem i nekim smolama.

U elektrotehnici se najčešće upotrebljava:

- bukveno,
- grabovo,
- javorovo i
- hrastovo drvo.



*Uzorak drva snimljen
mikroskopom iz laboratorija s
PC-okularom*

Koristi se za izradu poteznih motki uljnih sklopki, potpornih dijelova, stupova električnih i telefonskih zračnih vodova. Usitnjeno drvo se rabi kao punilo umjetnih smola, a furnir za izradu slojnih izolacija.

Drvo je glavni izvor celuloze od koje se proizvode za elektrotehniku važni materijali.

Papir je materijal vlaknaste strukture koji se pretežito sastoji od celuloze. U elektrotehnici se uglavnom primjenjuje papir od natron-sulfatne celuloze.

Prema namjeni razlikuje se papir za:

- kondenzatore, kabele i transformatore,
- za impregniranje sintetičkim smolama,
- za izradu složenih izolacija i
- za izoliranje transformatorskih i dinamo limova.

Papir za kondenzatore je debljine 6 do 25 μm , gustoće 1 do 1,25 mg/m^3 , dobre homogenosti, ima veću dielektričnu konstantu i visoku kemijsku čistoću. Obično se impregnira mineralnim uljima i drugim sredstvima.

Papir za kabele je debljine 80 do 200 μm , gustoće 0,6 do 0,8 mg/m^3 i veće mehaničke čvrstoće od kondenzatorskog.

Papir za transformatore je debljine oko 55 μm , gustoće 0,67 do 0,70 mg/m^3 , ima bolja mehanička svojstva od kablenskog i kemijsku čistoću kao kondenzatorski papir.



Vlknasta građa papira, različita uvećanja



Za impregniranje sintetičkim smolama se rabi papir debljina 30 do 300 μm , male gustoće i velike poroznosti, odnosno moći upijanja.

Ploče, štapovi i cijevi dobiveni impregnacijom ove vrste papira koriste se za elektroizolaciju namotaja transformatora, kao uvedne cijevi, izolacijske podloške vijka i sl.

Papir za složene izolacije služi kao nositelj osnovne izolacije pa mora imati veliku prekidnu čvrstoću. Debljina ovih papira je 15 do 50 μm .

Papir za izoliranje transformatorskih i dinamo limova debljine je 25 do 35 μm , gustoće oko 0,7 mg/m^3 . Ova vrsta papira se lijepi na limove jezgri električnih strojeva i transformatora zbog njihove međusobne izolacije.

Prešpan je jako čvrsti papir debljina 0,1 do 5 mm. S obzirom na primjenu razlikuje se:

- strojni,
- utorski,
- transformatorski i
- kondenzatorski prešpan.

Prve dvije vrste obično nisu impregnirane, dok se kod transformatora i kondenzatora prešpan impregnira mineralnim uljima.

Fiber se dobiva prešanjem poroznog papira koji je prethodno obrađen cinkovim kloridom. Vrlo je higroskopičan pa ima loša elektroizolacijska svojstva. Mehanička svojstva fibera su dobra i otporan je na djelovanje električnog luka. Proizvodi se u obliku ploča, štapova i cijevi, a koristi se za izradu lučnih komora.

Tekstilni elektroizolacijski materijali

Dobivaju se upredanjem i tkanjem organskih prirodnih ili sintetičkih vlakana. U odnosu na vlaknast, tekstilni elektroizolacijski materijali imaju veću homogenost i bolja mehanička svojstva, ali zbog velike higroskopičnosti manju dielektričnu čvrstoću. Za izradu tekstilnih elektroizolacijskih materijala

od prirodnih vlakana se uglavnom koriste:

- svila,
- pamuk,
- lan i
- juta.

Od sintetičkih:

- viskozna svila,
- acetatna svila,
- bakrena svila,
- acetilirani pamuk te
- poliamidna, poliuretanska, poli-
etilentereftalna i druga vlakna
- od umjetnih smola.

Pređa nastaje sukanjem elementarnih vlakana, a sukanjem više žica pređe nastaje konac.

Elektroizolacijske trake i tkanine se iz konca dobivaju tkalačkim postupcima.

Mehanička, električna i ostala svojstva (na primjer mogućnost impregniranja) ovise o vrsti upotrijebljenih vlakana i načinu tkanja. Kao impregnanti rabe se uljni lakovi, lakovi na bazi umjetnih smola, lakovi na bazi silikonskog kaučuka, asfalti, voskovi i drugi materijali. Ovako se dobiva niz tekstilnih impregiranih proizvoda:

- uljno svilene tkanine i vrpce (debljine 0,05 do 0,25 mm),
 - uljno pamučne tkanine i vrpce (debljine 0,1 do 0,6 mm),
 - crne (asfalt) svilene i pamučne tkanine i vrpce,
 - uljne ili voštane pamučne ili svilene navlake (bužir cijevi), itd.
- Impregnirane tkanine, vrpce i cijevi koriste se u elektrotehnici za omatanje, za elektroizolaciju svitaka i vodiča, u izradi složenih izolacija i sl.

Elektroizolacijski lakovi, zalivne mase i kitovi

Elektroizolacijski lakovi su tekućine koje nastaju otapanjem smola (prirodnih i sintetičkih), bitumena, sušivih ulja i drugih materijala u prikladnim isparivim otapalima. Sušenjem otapalo ispari, a lak očvrstne tvoreći tanki film koji ima dobra mehanička i električna svojstva i malu higroskopičnost.

Elektroizolacijski lakovi dijele se prema kemijskom sastavu, temperaturi sušenja i primjeni.

Prema kemijskom sastavu elektroizolacijski lakovi pripadaju jednoj od skupina: uljni lakovi, lakovi na bazi modificiranih (polivinilacetatni, poliepirepoksidni, poliuretanski, polisilikonorganski i dr) i nemodificiranih (glitalni, fenolformaldehidni, poliamidni, polistirenski i dr) sintetičkih polimera i lakovi na bazi prirodnih smola i efira celuloze.

Elektroizolacijski lakovi, zalivne mase i kitovi

Prema temperaturi sušenja razlikuju se elektroizolacijski lakovi koji se suše pri sobnoj temperaturi (oko 20 °C) i pri povišenoj temperaturi (iznad 70 °C).

Elektroizolacijski lakovi se prema primjeni dijele na:

- lakove za impregniranje,
- lakove za površinske premaze i
- vezivne lakove.

Elektroizolacijski lakovi, zalivne mase i kitovi

Impregnacijski lakovi se upotrebljavaju za impregniranje svitaka električnih strojeva i transformatora te poroznih elektroizolacijskih materijala. Impregniranje se obavlja uranjanjem ili u vakuumu.

Površinski lakovi služe za zaštitu dijelova od vlage, ulja, kemijskih sredstava, korozije, itd. Redovito im se dodaju pigmenti (oksidi metala), a nanose se uranjanjem, prskanjem, prelijevanjem ili premazivanjem. Upotrebljavaju se za lakiranje metalnih dijelova, za lak-žicu, za izoliranje feromagnetskih limova i sl.

Elektroizolacijski lakovi, zalivne mase i kitovi

Vezivni lakovi se koriste pri izradi složenih izolacija. Mogu se upotrebljavati i kao ljepljivo. Kao vezivni lakovi najviše se rabe lakovi na bazi šelaka, alkidnih i epoksidnih smola.

Zalivne mase (kompaundi) za razliku od elektroizolacijskih lakova ne sadrže otapala pa imaju veću gustoću.

Sastoje se od različitih smola, bitumena, voskova, ulja i drugih materijala, a mogu im biti dodana punila (kremeno brašno, kaolin i sl.) i plastifikatori.

Najduže primjenjivana je zalivna masa na bazi bitumena kojoj mogu biti dodana i sušiva ulja.

U elektronici je korištena zalivna masa na bazi etilceluloze i cerezina.

Danas prevladavaju zalivne mase na bazi sintetičkih termostabilnih poliesterskih i epoksidnih smola.

Elektroizolacijski lakovi, zalivne mase i kitovi

Elektroizolacijski kitovi su plastični materijali koji služe kao vezivo, a otvrdnjuju kemijskom reakcijom ili sušenjem. Imaju veliku unutrašnju koheziju i ljepljivost prema drugim materijalima.

Anorganski su gips-kit, magnezijev ili roza-kit i portlandcementni-kit. Otvrdnjavaju na sobnoj temperaturi, a koriste se za povezivanje keramike i metala.

Organski kitovi se izrađuju od sintetičkih smola, a mogu imati različita punila (kremeno brašno, kaolin, azbest i sl.). Dosta se koriste kitovi na bazi epoksidnih smola.

Materijal	Gustoća [Mg/m ³]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Relativno produženje kod prekida [%]	Volum- na ρ [Ωm]	E _{pr} [MV/m]	ε _r (1 kHz)	Faktor rasipanja (1 kHz) [%]	Tempe- raturno područje [°C]
prirodna guma	0,93÷1,7	10,3÷27,6	300÷700	10 ¹¹ ÷10 ¹⁴	5,9÷19,7	2,3÷3	0,003	-40÷70
silikonska guma	0,97÷1,6	6,9	100÷500	10 ¹² ÷10 ¹⁴	3,9÷27,6	-÷3,5	0,001÷0,01	-60÷200
neopren	1,03÷1,6 5	8,3÷18,6	300÷700	10 ⁹ ÷10 ¹¹	5,9÷23,6	5÷9	3,5	-30÷90
hypalon	1,15÷1,7	8,3÷15,2	300÷600	10 ¹⁰ ÷10 ¹²	19,7	7÷11	0,05÷0,07	-30÷105
polivinil klorid - standardni	1,16÷1,7	10,3÷31	40÷400	10 ⁹ ÷10 ¹³	9,85÷ 19,7	3÷8	0,009÷0,16	-20÷80
polivinil klorid - premium	1,3	-	-	10 ¹⁰	19,7	7	-	-55÷105
križno ulančani PVC	1,3	-	-	>10 ¹⁰	19,7	5	-	-55÷115
polietilen - puni	0,91÷ 1,26	10,3÷15,2	180÷600	10 ¹⁴ ÷10 ¹⁶	9,1÷ 55,95	2,27÷ 2,5	0,00049	-60÷80

polietilen - pjenasti	0,5	-	-	10 ¹⁶	-	1,5	-	-60÷80
rulan	1,3	-	-	10 ¹⁵	16,5	2,8	-	-50÷80
teflon TFE i FEP	2,12÷2,2	6,9÷24,1	250÷330	>10 ¹⁶	19,7÷ 23,6	2÷2,1	0,0001÷ ÷0,0007	-70÷250
teflon PFA	2,1	-	-	10 ¹⁶	23,6	2,1	-	-70÷250
najlon	1,07÷1,1 4	-	-	10 ¹²	17,7	4÷4,6	0,04	-40÷120
polipropi- len	0,89÷0,9 1	20÷31	700	2,8x10 ¹³	17,7÷33, 5	2,2÷2,6 5	0,0036÷ ÷0,005	-40÷105
etilen pro- pilen kopo- limer	0,86	-	-	10 ¹⁵	35,5	3,3	-	-40÷80
križno ulančani poliolefin (polialken)	1,3	-	-	>10 ¹³	23,6	2,5	-	-50÷125
kynar	1,75÷ 1,78	35,9÷51,7	500	2x10 ¹²	10,2	5÷7,9	0,019	-40÷150
križno ulančani kynar	1,8	-	-	2x10 ¹²	9,85	5÷6	-	-55÷175
poliuretani	1,1÷1,3	>24,1	540÷750	10 ⁹ ÷10 ¹³	13÷24,8	5÷8	0,043÷ ÷0,06	-50÷80
polisulfon	1,24	-	-	5x10 ¹⁴	15,8	3,1	-	-55÷150
kapton	1,4	-	-	10 ¹⁶	275,8	3,5	-	-40÷200
fluorosili- kon	1,4	-	-	10 ¹²	13,8	7	-	-60÷200
tefel	1,7÷1,86	44,8	200	>10 ¹⁴	19,7	2,6	0,0006	-70÷180
halar	1,68	-	-	10 ¹⁷	19,3	2,6	-	-70÷165

Oznaka*: Otpornost prema ultraljubičastoj svjetlosti s odgovarajućim pigmentom

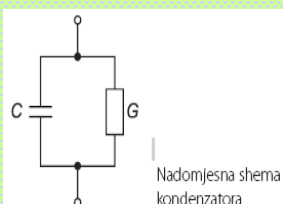
Materijal	Opornost prema stat. deformaciji	Opornost prema trošenju	Opornost prema porenju	Savitljivost	Opornost prema klim. utjecajima	Opn. prema alifatskim ugljikovodic.	Opn. prema aromatskim ugljikovodic.	Opn. prema kloranim ugljikovodic.
4 – najveća; 3 – znatna; 2 – osrednja; 1 – slaba								
prirodna guma	4	4	1	4	1	1	1	1
silikonska guma	3	1	1	4	4	3	2	3
neopren	4	4	3	4	4	3	1	1
hypalon	3	4	3	3	4*	3	1	1
polivinil klorid - standardni	2	2	4	3	4	1	1	2
polivinil klorid - premium	2	3	4	3	4	1	1	2
križno ulančani PVC	2	3	4	3	4	3	3	3
polietilen – puni	1	3	1	2	4*	3	3	3
polietilen – pjenasti	1	1	1	3	4*	1	1	1
ruhan	1	3	4	3	4	3	2	2
teflon TFE i FEP	2	4	4	2	4	4	4	4
teflon PFA	3	4	4	2	4	4	4	4
najlon	3	4	1	1	4	4	3	4
polipropilen	3	4	1	1	4*	3	3	3
etilen propilen kopolimer	3	3	1	4	4	3	3	3
križno ulančani poliolefin (polialken)	2	3	4	3	4	4	4	4
kynar	3	4	4	3	4	4	4	4
križno ulančani kynar	3	4	4	3	4	4	4	4
poliuretan	3	4	1	4	4	3	3	3
polisulfon	3	3	4	3	3	4	3	4
kapton	3	4	4	4	4	4	4	4
fluorosilikon	3	4	4	4	4	4	4	4
tefzel	3	4	4	2	4	4	4	4
halar	3	4	4	2	4	4	4	4

Oznaka*: Otpornost prema ultraljubičastoj svjetlosti s odgovarajućim pigmentom.

KONDENZATORI

Kondenzator je komponenta električnog kruga čije je dominantno svojstvo kapacitet.

Kondenzatori čuvaju električnu energiju i blokiraju protok istosmjerne struje, a propuštaju izmjeničnu struju. Sastoje se od dvije elektrode i dielektrika između njih. Struja kroz kondenzator ne teče osim u slučaju proboja, kad kondenzator postaje neupotrebljiv. Između nabijenih pločica javlja se električno polje razmjerno naponu i obrnuto razmjerno razmaku pločica. Iz nje se računaju frekvencijske karakteristike.

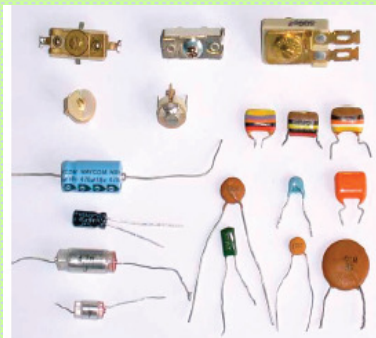


Kondenzatori se prema dielektriku razvrstavaju na zračne, papirne, keramičke, staklene, teflonske, polistirenske, itd. Prema tehnologiji izrade, kondenzatori se mogu podijeliti u više grupa.

KONDENZATORI

Film/folija kondenzatori imaju obloge od tankih metalnih traka, filmova ili pločica. Dielektrik je folija od papira, poliestera, polipropilena ili polistirena. Obloge i dielektrik zajedno su savijeni u pogodan oblik s dodanim izvodima i površinski su zaštićeni.

Metalizirani film kondenzatori su oni kod kojih je dielektrični film od polikarbonata ili poliestera metaliziran naparavanjem metala. Film s naparenim oblogama savijen je u pogodan oblik. Opseg vrijednosti kapaciteta približno je od $0,01 \mu\text{F}$ do $10 \mu\text{F}$. Probojni naponi su od 100 V do 1600 V .



Različiti kondenzatori

KONDENZATORI

Keramički kondenzatori obično su malih dimenzija. Proizvode se najčešće s kapacitetima od $0,47 \text{ pF}$ do 470 nF , uz probojne napone približno od 6 V do 2000 V .

Elektrolitski kondenzatori sastoje se od dielektrika čiji je sloj aluminijevog oksida dobiven elektrokemijskim djelovanjem na aluminijsku oblogu uronjen u elektrolit. Obično su valjkastog oblika. Kapacitet elektrolitskih kondenzatora najčešće je od $0,1 \mu\text{F}$ do 150 mF , a probojni naponi približno su od 4 V do 400 V .

Tantal kondenzatori vrlo su malih dimenzija, zrnatog oblika, kapaciteta najčešće od $1,6 \mu\text{F}$ do $40 \mu\text{F}$ i probojnog napona od $1,6 \text{ V}$ do 40 V .

Kondenzatori mogu biti fiksni (blok, elektrolitski i sl.) i promjenjivi.

KONDENZATORI

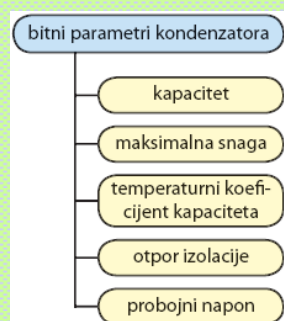
Kondenzatori se prema primjeni dijele na:

- one s malim gubicima i velikom stabilnošću kapaciteta
- one sa srednjim gubicima i srednjom stabilnošću kapaciteta.

U prvu skupinu ubrajaju se kondenzatori napravljeni od mlike, stakla, keramika s malim ϵ_r , plastičnog filma s malim gubicima (polipropilen, poliester). Služe za kritične primjene kao precizni kondenzatori (npr. aktivni i pasivni telekomunikacijski filtri).

Kondenzatori sa srednjom stabilnošću kapaciteta izrađuju se od papira impregniranog uljem ili voskom, plastičnog filma i keramika sa srednjim i velikim ϵ_r . Služe za opću primjenu i u istosmjernim i u izmjeničnim krugovima, kao što su sprega, premošćivanje, filtriranje, pokretanje rotora itd.

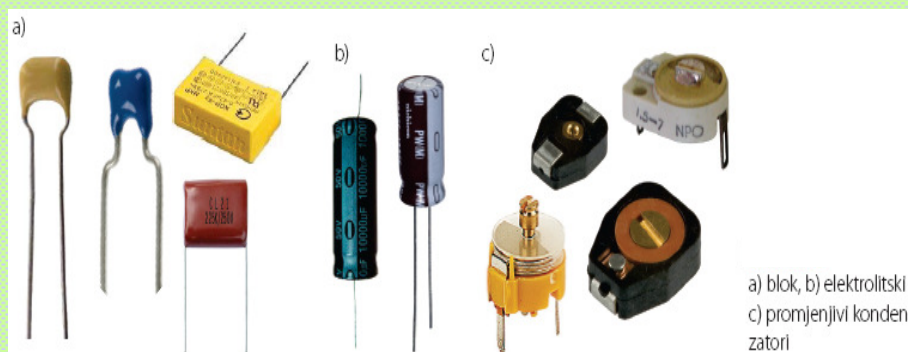
KONDENZATORI



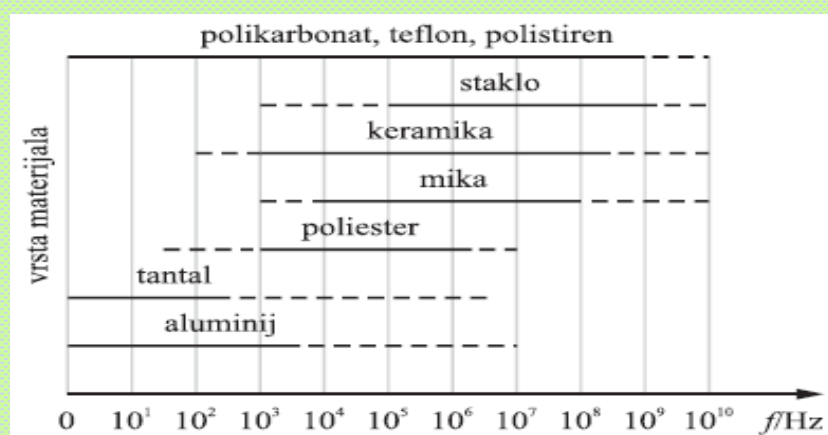
Dozvoljeni maksimalni napon obično je napisan na tijelu kondenzatora, ispod oznake za kapacitet. Dozvoljeni radni napon mora biti veći od najvećeg napona koji se može u normalnim slučajevima pojaviti u strujnom krugu.

Posljedica skladištenja električne energije jest ta da kondenzatori mogu biti naelektrizirani još dugo nakon što je napajanje isključeno. To može biti opasno. Kondenzatori priključeni na visoki napon napunjeni su velikim količinama elektriciteta. Ove kondenzatore treba pažljivo prazniti pomoću otpornika odgovarajuće otpornosti prislonjenog između izvoda kondenzatora.

KONDENZATORI



KONDENZATORI



Slika 1

Primjene različitih kondenzatora s obzirom na frekvencijsko područje (puna linija – dobro, isprekidana – djelomično, inače se ne primjenjuju)

KONDENZATORI

Tablica 1

Primjena kondenzatora od različitih dielektrika

Dielektrik	Blokiranje	Odvajanje	Premošćivanje	Sprega	Filtriranje
mika	x	x	x	x	x
keramika	x		x	x	x
aluminij	x		x	x	x
plastika	x	x	x	x	x
vakuum	x		x	x	x
staklo	x		x	x	x
tantal	x		x	x	x
metalizirana plastika	x	x	x	x	x
Dielektrik	Ugađanje	Temperaturna kompenzacija	Pokretanje motora	Vremensko vođenje	Potiskivanje šuma
mika	x			x	
keramika	x	x			
aluminij					
plastika				x	x
vakuum	x				
staklo	x			x	
tantal			x		x
metalizirana plastika			x	x	x

KONDENZATORI

Promjenjivi kondenzatori imaju najčešće zrak kao dielektrik. Sastoje se od dva skupa preklapajućih metalnih pločica.

Pokretne pločice mogu se zakretati osovinom za oko 180°. Kod potpunog je preklapanja kapacitet kondenzatora najveći. Manjih dimenzija za jednak kapacitet su kondenzatori s čvrstim dielektrikom između pločica. Trimer kondenzatori manjih su dimenzija, a kao dielektrik između obloga raznih oblika koriste se zrak, mika ili keramika.

Slika 1 prikazuje kada se mogu primjenjivati pojedini češći dielektrici s obzirom na radnu frekvenciju. Tablica 1 prikazuje primjenu kondenzatora od različitih dielektrika s obzirom na osnovnu namjenu: blokiranje, premošćivanje, odvajanje, ugađanje, filtriranje i dr.

Vrijednosti kapaciteta, odstupanje i probojni napon najčešće se označavaju alfanumerički. Kondenzatori označeni bojama rjeđe se susreću. Brojčane vrijednosti boja odgovaraju vrijednostima za otpornike uz iskazivanje u pF.

Pitanja za ponavljanje

- Polarizacija dielektrika (vrste polarizacije i njihove razlike, Clausius – Mossottieva jednačba).
- Koje su glavne značajke plinovitih dielektričnih materijala? Navedite tipične pretstavnike.
- Razlika termoplastičnih i termostabilnih materijala. Poliesterske smole.
- Objasnite vektor polarizacije i ovisnost relativne konstante permeabilnosti o uvjetima u okolini (polje, temperatura i sl.).
- Bitumen i asfalt.
- Tekući kristali – značajke, utjecaj električnog polja, APAPA.
- Dielektrički gubici (uzroci, Jouleovi gubici, ovisnost ϵ_r o ionizacijskim gubicima).
- Objasnite elektrotermički i elektrokemijski proboj čvstih dielektričnih materijala, starenje materijala pod utjecajem električnog polja i električni proboj plinovitih dielektričnih materijala.
- PVC, kaučuk i guma.