

## 5 Elektrické vlastnosti izolantov a dielektrík

### 5.1 Fyzikálna podstata elektrických vlastností izolantov

Izolanty a dielektriká tvoria veľmi rozsiahlu skupinu materiálov, ktoré sa v praxi využívajú pre rôzne účely. Podrobnejšie informácie z oblasti izolantov a dielektrík uvádzajú publikácie [3, 8, 9, 10, 24, 27].

Izolanty sú látky, ktorých hlavnou technickou vlastnosťou je schopnosť klásť veľký odpor elektrického prúdu. Využívajú sa najmä pre izoláciu vodivých telies s rôznym potenciálom. Ich hlavným parametrom je rezistivita. Dielektriká sú látky, ktoré majú schopnosť hromadiť elektrickú energiu napr. v kondenzátoroch a tiež sa využívajú ako kapacitné prvky v elektronických obvodoch. Ich hlavným parametrom je relatívna permitivita.

Náboje elektricky nabitých častíc izolantov a dielektrík sú viazané na pevné miesta. Ideálny izolant je látka zložená výhradne z nábojov vzájomne viazaných elektrostatickými silami. Keďže neobsahuje voľne pohyblivé elektrické náboje, nemôže ňou pôsobením vonkajšieho elektrického poľa tiecť prúd, teda jej elektrická vodivosť je nulová a nevznikajú v nej dielektrické straty. Reálny izolant obsahuje malé množstvo voľných nábojov, jeho vodivosť  $\sigma < 10^{-8} \text{ Sm}^{-1}$ . Z hľadiska pásmovej teórie sa bude látka chovať ako izolant, ak všetky energetické hladiny najvyššieho valenčného pásma budú plne obsadené, energetický pás  $\Delta W_z$  zakázaných energií dostatočne široký ( $> 3\text{eV}$ ) a energetický vodivostný pás prázdny.

Reálny izolant v plynnom, kvapalnom a tuhom stave charakterizujeme:

- relatívnu permitivitou  $\epsilon_r$ ,
- elektrickou vodivosťou  $\sigma$  (elektrickou vodivosťou vnútornou  $\sigma_v$  a povrchovou  $\sigma_s$ ),
- dielektrickými stratami  $\text{tg}\delta$ ,
- elektrickou pevnosťou  $E_p$ .

Každý izolant je súčasne dielektrikom, avšak nie každé dielektrikum je izolantom. V dielektriku využívame polarizovateľnosť jeho kladných a záporných nábojov na zvýšenie kapacity elektród, medzi ktorými sa nachádza. Viazané náboje môžu tvoriť molekuly neutrálne (nepolárne) s úplne symetrickou stavbou, takže ich ťažiská splývajú a výsledné pole je nulové. Chemické väzby sú kovalentné, bez dipólového momentu. Pôsobením vonkajšieho poľa sa symetria nábojov poruší a ich ťažisko presunie. Nepolárna molekula vytvorí elektrický dipól a získa indukovaný elektrický moment. Patria sem  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SF}_6$ . Molekuly dipólové (polárne) majú nesymetrickú stavbu a trvalý elektrický moment, vyplývajúci z povahy chemických väzieb a priestorového usporiadania atómov v molekulách, smerujúci od záporného náboja ku kladnému v smere spojnic ich ťažísk. Jeho absolútna hodnota  $\mu_0 = e \cdot l$ , kde  $l$  je polohový vektor kladného náboja vzhľadom k zápornému.

Dielektriká sa využívajú pre konštrukciu kondenzátorov a tiež ako elektroluminiscenčné látky, piezoelementy, pamäťové prvky, zobrazovacie jednotky a sú základným funkčným materiálom mikroelektroniky a optoelektroniky. Izolanty sú súčasťou každého elektrotechnického zariadenia. Napr. feroelektriká (titaničitán bárnatý) sú vysoko dielektrické materiály so spontánnou nelineárnou polarizáciou závislou na intenzite elektrického poľa a s radom feroelektrických vlastností.

Izolanty sa charakterizujú **triedou tepelnej odolnosti izolantu**, ktorá klasifikuje tepelnú odolnosť izolantu z hľadiska maximálnej teploty, pri ktorej izolačný systém pri trvalom, prípadne cyklickom namáhaní vykazuje optimálnu životnosť. Izolačné materiály možno zaradiť do 7 teplotných tried, ktoré sa vyjadrujú najvyššou medznou teplotou ( $^{\circ}\text{C}$ ), ktorej izolant odoláva (tab.5.1):

Tabuľka 5.1 Triedy tepelnej vodivosti izolantov

Trieda	Medzná teplota (°C)	Charakteristika triedy
Y	90	Izolanty z neimpregnovaných látok ako bavlna, hodváb, papier a ich kombinácie
A	105	Izolanty ako v triede Y, ale impregnované, lakované alebo ponorené do izolačnej kvapaliny
E	120	Izolanty, ktoré znesú medznú teplotu počas prevádzky
B	130	Izolácia zo sľudy, sklenených vlákien, azbestu v kombinácii s vhodným spojivom (šelak, asfalt, bitumén)
F	155	Izolácia ako v triede B v spojení so spojivami, ktoré vydržia požadovanú teplotu (zosieťované polyesterové živice, silikónové živice)
H	180	Izolácia z látok ako sú elastoméry, sľuda, sklenené tkaniny. Ako spojivo možno použiť silikónové živice.
C	viac ako 180	Anorganické izolanty (sľuda, porcelán, sklo, kremeň)

## 5.2 Polarizácia dielektrika

Polarizácia dielektrika je proces, pri ktorom dochádza k narušeniu symetrie elektrických nábojov. Následkom toho sa v dielektriku vytvárajú elektrické dipóly, z ktorých každý má svoj elektrický dipólový moment.

Vplyvom síl vonkajšieho a vnútorného elektrického poľa dochádza k vysúvaní elektricky viazaných nábojov dielektrika z pôvodných rovnovážnych polôh. Ak látka obsahuje dipólové molekuly, orientujú sa tieto v smere poľa, vytvárajú indukované dipóly vzájomným vysunutím ťažísk opačných nábojov z rovnovážnych polôh. Mierou uvedeného procesu je polarizovateľnosť. *Polarizovateľnosť je základná fyzikálna vlastnosť dielektrík. Jej makroskopickou mierou je relatívna permitivita  $\epsilon_r$  a stratový činiteľ  $\text{tg}\delta$  a s nimi súvisiace dielektrické straty a starnutie izolantov.*

### 5.2.1 Elektrická polarizácia dielektrík

#### 5.2.1.1 Polarizácia z makroskopického hľadiska

Na polarizáciu (na vektor polarizácie  $\vec{P}$ ) sa pozeráme ako na pomer dipólového momentu  $\Delta \vec{M}$  k jednotke objemu izolantu  $\Delta V$ :

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (5.1)$$

Tento dipólový moment vzniká ako výsledok existencie obrovského počtu dipólových momentov mikroskopických častíc dielektrika. Dipólové momenty môžeme z hľadiska ich pôvodu rozdeliť do dvoch skupín:

- Dipólové momenty, ktoré vznikajú účinkom vonkajšieho elektrického poľa. Takéto momenty sa nazývajú *indukované dipólové momenty* a dipóly, ktoré takto vznikajú, sa nazývajú indukované dipóly.
- Dipólové momenty, ktoré vznikajú nezávisle na vonkajšom elektrickom poli a sú prirodzenou vlastnosťou molekúl dielektrika. Tieto momenty sa nazývajú *permanentné dipólové momenty* a dipóly, ktoré takto vznikajú sa nazývajú permanentné dipóly.

Pre vákuový kondenzátor pre časovo nepremenné pole platí:

$$Q_0 = C_0 \cdot U \quad (5.2)$$

kde  $Q_0$  (C) je náboj na doskách vákuového kondenzátora,  
 $C_0$  (F) je kapacita vákuového kondenzátora,  
 $U$  (V) je napätie na doskách kondenzátora.

Pre intenzitu elektrického poľa medzi doskami kondenzátora potom máme vzťah:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{Q_0}{C_0 \cdot d} \quad (5.3)$$

kde  $E$  ( $\text{Vm}^{-1}$ ) je intenzita elektrického poľa,  
 $d$  (m) je vzdialenosť medzi elektródami kondenzátora.

Kapacitu doskového kondenzátora určíme zo vzťahu:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (5.4)$$

kde  $S$  ( $\text{m}^2$ ) je plocha elektród,  
 $\varepsilon_0$  ( $\text{Fm}^{-1}$ ) je permitivita vákua.

Odtiaľ sa intenzita elektrického poľa  $E$  vypočíta ako

$$E = \frac{Q_0}{\varepsilon_0 \cdot S} = \frac{\xi_0}{\varepsilon_0} \quad (5.5)$$

kde

$$\xi_0 = \frac{Q_0}{S} \quad (5.6)$$

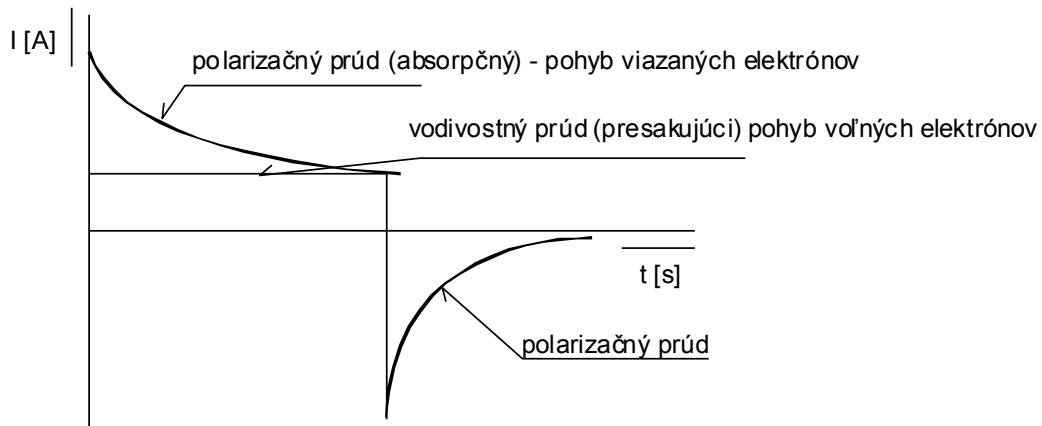
kde  $\xi_0$  ( $\text{C/m}^2$ ) je plošná hustota náboja na elektródach.

Na obr. 5.1 je pre ilustráciu existencie polarizačného a vodivostného prúdu znázornená časová závislosť prúdu tečúceho dielektrikom po pripojení jednosmerného napätia a následnom skratovaní elektród. Ak odpojíme kondenzátor od zdroja napätia, ostane náboj na doskách nezmenený. Pri vsunutí izolantu medzi dosky kondenzátora sa dielektrikum a v dôsledku toho na povrchu kondenzátora vznikne náboj  $+Q_p$  a  $-Q_p$ . Tento náboj viaže časť voľných nábojov na elektródach, následkom čoho poklesne intenzita elektrického poľa medzi doskami kondenzátora na hodnotu:

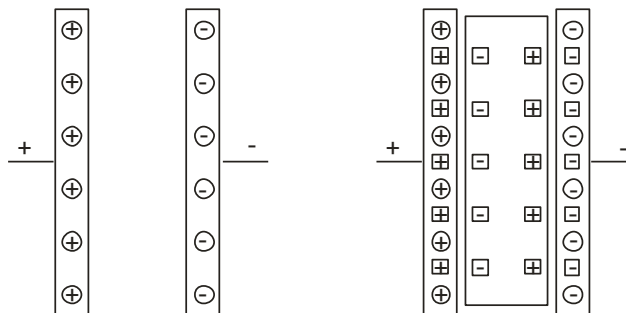
$$E' = \frac{E}{\varepsilon_r} \quad (5.7)$$

$$Q = Q_0 + Q_p \quad (5.8)$$

kde  $Q$  (C) je celkový náboj na povrchu elektród kondenzátora.



Obr. 5.1 Časová závislosť prúdu tečúceho dielektrikom po pripojení jednosmerného napätia a následnom skratovaní elektród



Obr. 5.2 Proces polarizácie dielektrík

Kapacitu kondenzátora, ak je medzi jeho elektródami dielektrikum, vypočítame:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q \cdot Q_0}{Q_0 \cdot U} = \epsilon_r \cdot C_0 \quad (5.9)$$

kde  $\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{Q}{Q_0}$  je relatívna permitivita dielektrika.

Makroskopická polarizácia dielektrika je potom:

$$P = \frac{M}{V} = \frac{Q_p \cdot d}{s \cdot d} = \frac{Q_p}{S} = \xi_p \quad (5.10)$$

kde  $\xi_p$  je plošná hustota náboja na povrchu elektród kondenzátora.

Dosadením neznámych do rovnice  $Q = Q_0 + Q_p$  dostávame rovnicu:

$$\epsilon_r \cdot C_0 \cdot U = \epsilon_0 \cdot S \cdot E + S \cdot P \quad (5.11)$$

$$D = D_0 + P \quad (5.12)$$

kde  $D$  ( $\text{Cm}^{-2}$ ) je elektrická indukcia izolantu ( $D = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot E$ ),  
 $D_0$  ( $\text{Cm}^{-2}$ ) elektrická indukcia vo vákuu ( $D_0 = \epsilon_0 \cdot E$ ).

Dielektrická makroskopická polarizácia sa potom vyjadří ako:

$$P = \varepsilon_0 E (\varepsilon_r - 1) = \varepsilon_0 \kappa E \quad (5.13)$$

pričom  $\varepsilon_0$  je permitivita vákua a  $\kappa = (\varepsilon_r - 1)$  dielektrická susceptibilita.

### 5.2.1.2 Polarizácia z mikroskopického hľadiska

Z mikroskopického hľadiska sa na polarizáciu pozeráme ako na pružné posunutie viazaného náboja v smere (záporný náboj) alebo proti smeru (kladný náboj) elektrického poľa, resp. ako na pootočenie permanentných dipólových momentov molekúl do smeru elektrického poľa. V dôsledku tohto pohybu nadobudnú častice indukované dipólové momenty, ktoré možno vyjadriť:

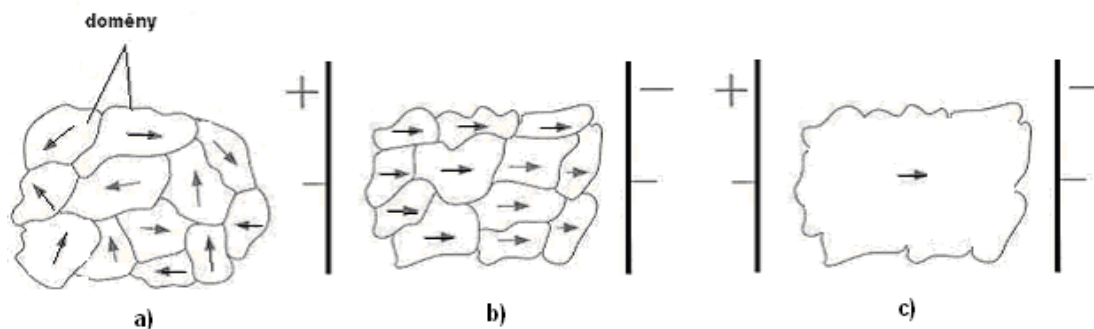
$$\vec{\mu}_i = \alpha \cdot \vec{E}_l \quad (5.14)$$

kde:  $\vec{\mu}_i$  (Cm) je indukovaný dipólový moment častice,  
 $\alpha$  (Fm<sup>2</sup>) je polarizovateľnosť častice,  
 $\vec{E}_l$  (Vm<sup>-1</sup>) je intenzita lokálneho elektrického poľa.

### 5.2.2 Druhy polarizácie dielektrík

Celková polarizácia dielektrika je často výsledkom súčasnej existencie niekoľkých druhov polarizácie. Jednotlivé druhy polarizácie možno roztriediť na pružné, relaxačné a špeciálne:

- **pružná elektrónová a iónová** polarizácia – polarizácia rýchleho priebehu, veľmi krátkej doby trvania ( $10^{-12}$  -  $10^{-15}$  s) a bez strát energie, spočívajúca v posuve rovnakého množstva kladných a záporných pružne viazaných nábojov opačnými smermi.
- **relaxačná dipólová a iónová** polarizácia – polarizácia pomalého priebehu. Pôsobením vonkajšieho poľa sú chaotické tepelné pohyby polárnych častíc usmernené, čím vznikne nesymetrické rozloženie nábojov a tým vzrast dipólového momentu. Relaxačný čas  $\tau$  ( $10^{-2}$  -  $10^{-10}$  s) je interval, za ktorý po odpojení elektrického poľa klesne relaxačná polarizácia na 37 % pôvodnej hodnoty – usporiadanosť viazaných elektrických nábojov sa zmenší na 1/2,7.
- **medzivrstvová (migračná)** polarizácia – vznik indukovaného dipólového momentu na makroskopické vzdialenosti v dôsledku rôznej pohyblivosti voľných nábojov nemajúcich možnosť neutralizácie na elektródach. Za účinku vonkajšieho poľa sa hromadia pri blokujúcich bariérach rôznej povahy a vytvárajú priestorové náboje s rovnakými vonkajšími prejavmi, ako polarizácie iného druhu. Je typická pre nehomogénne dielektriká (viacvrstvé izolanty, disperzné systavy) a má nelineárny charakter. Doba ustálenia je  $10^{-3}$  -  $10^{-7}$  s. Na obr. 5.3 je doménová štruktúra feroelektrických látok znázornená bez pôsobenia elektrického poľa (v monokryštále sú rozhrania domén lineárne), v elektrickom poli a v silnom elektrickom poli, v ktorom vznikne jednodoménový útvar.



Obr. 5.3 Doménová štruktúra feroelektrických látok a) bez pôsobenia elektrického poľa, b) v elektrickom poli c) v silnom elektrickom poli

- **spontánna (samovoľná)** polarizácia – orientácia spontánne vytvorených elektrických momentov do smeru intenzity vonkajšieho elektrického poľa. Je typická pre feroelektriká - s doménami s nesymetricky rozloženým elektrickým nábojom aj bez prítomnosti vonkajšieho elektrického poľa. Preto domény vykazujú permanentný dipólový moment. Závislosť vektora polarizácie od intenzity elektrického poľa je nelineárna, pričom zložka spontánnej polarizácie má stav nasýtenia už v slabých elektrického poľa. Závisí od kmitočtu a nad Curieho teplotou zaniká.
- **rezonančná** polarizácia – súvisiaca s vlastnou frekvenciou kmitania elektrónov. Môže byť elektrónová a iónová. Vyskytuje sa pri frekvencii viditeľného svetla a je dôležitá pre spektrálnu analýzu.

### 5.3 Dipólový moment, polárne a nepolárne molekuly

Polaritu väzby vyjadruje dipólový moment vektoru  $\underline{\mu} = Ql$  daný spojnicou nábojov so smerom od ťažiska záporného náboja ku kladnému. Z hodnoty dipólového momentu možno preto odvodiť štruktúru danej molekuly, jeho hodnotu však ovplyvňuje aj prítomnosť voľných elektrónových párov s vlastným dipólovým momentom, preto napríklad nie všetky nepolárne molekuly obsahujú nepolárne väzby.

U látky tvorenej nepolárnymi molekulami sú ťažiská opačných nábojov na jednom mieste, ale ich umiestnením do vonkajšieho elektrického poľa sa vysunú a vzniká indukovaný dipólový moment

$$\mu_{ind} = \alpha \cdot E \quad (5.15)$$

kde  $\alpha$  je koeficient polarizovateľnosti (deformability) molekuly ( $Fm^2$ ).

Zvýšenie kapacity kondenzátora voči usporiadaniu vo vákuu je dané polarizáciou dielektrika, pričom úmerne tomu sa v ňom zníži intenzita elektrického poľa kompenzáciou indukovanými dipólovými momentmi polarizovaného dielektrika. Polarizácia na jednotkové látkové množstvo – molová polarizácia podľa **Clausius - Mossottiho rovnice** sa vypočíta:

$$P = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0}, \quad (5.16)$$

kde: M je molová hmotnosť,  
 $\rho$  ( $gcm^{-3}$ ) merná hmotnosť látky.

U nepolárnych látok

$$P = P_{ind} \neq f(T) \quad (5.17)$$

## 5.4 Relatívna permitivita

Permitivita dielektrika charakterizuje vplyv elektrického poľa na elektrický stav dielektrika. Relatívna permitivita patrí k najdôležitejším technickým charakteristikám. Je merítkom polarizácie dielektrika, t.j. závisí od polarizácií, ktoré sa v danej látke vyskytujú. Veľkosť relatívnej permitivity závisí na druhu polarizácie, na vnútornej stavbe dielektrika a na polarizovateľnosti atómov a molekúl.

Podľa Coulombovho zákona vyjadruje relatívna permitivita vplyv prostredia na veľkosť sily pôsobiacej medzi nábojmi, nachádzajúcimi sa v určitej vzdialenosti  $r$ :

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2} \quad (5.18)$$

Relatívna permitivita udáva, koľko krát je sila pôsobiaca na náboj v danom prostredí menšia ako vo vákuu alebo pomer kapacity kondenzátora s príslušným dielektrikom voči usporiadaniu vo vákuu:

$$\epsilon_r = \frac{Q_x}{Q_0} = \frac{C_x}{C_0} \quad (5.19).$$

kde  $C$  je kapacita kondenzátora, ktorého dielektrikom je materiál s relatívnou permitivitou  $\epsilon_r$ ,  $C_0$  je kapacita kondenzátora rovnakého usporiadania, ktorého dielektrikom je vákuum.

Relatívna permitivita je bezrozmernou veličinou, ktorá závisí najmä od:

- charakteru polarizačných procesov,
- teploty,
- frekvencie.

V niektorých prípadoch je evidentný aj vplyv elektrického poľa na relatívnu permitivitu.

Pre plynné dielektrikum je relatívna permitivita  $\epsilon_r$  väčšia alebo približne rovná 1. U nepolárnych kvapalných izolantov sa pohybuje od 1,8 do 2, u nepolárnych tuhých látok od 2 do 2,2, u slabopolárnych tuhých látok od 2,2 do 3, u polárnych látok od 3 do niekoľko sto alebo tisíc. Iónové amorfné a kryštalické majú relatívnu permitivitu od 10 do 100, a feroelektriká majú relatívnu permitivitu do 10 000.

Okrem relatívnej permitivity rozlišujeme v technickej praxi aj permitivitu statickú, komplexnú a optickú.

Relatívna permitivita závisí od mnohých vonkajších činiteľov, a preto ju nemožno považovať za materiálovú konštantu. Pretože mechanizmus polarizácie je rozdielny v rozličných skupenstvách, v ďalšom texte je relatívna permitivita analyzovaná osobitne u plynných, kvapalných a u tuhých izolantov.

### 5.4.1 Permitivita plynných izolantov

V plynných izolantoch sú vzdialenosti medzi molekulami také veľké, že ich vzájomné pôsobenie možno zanedbať. V nepolárnych plynch sa vyskytuje iba elektrónová polarizácia, kým v polárnych plynch elektrónová a dipólová polarizácia. S ohľadom na malú hustotu molekúl v plyne je **relatívna permitivita plynov blízka jednej**.

Polarizácia plynu môže byť len elektrónová, ak sú molekuly bez dipólového momentu alebo môže byť elektrónová a dipólová, ak majú molekuly dipólový moment. Relatívna permitivita je tým väčšia, čím je väčší polomer molekuly plynu (so zväčšovaním polomeru molekuly rastie koeficient polarizovateľnosti molekuly).

Číselné údaje v tab. 5.2 ukazujú závislosť relatívnej permitivity vzduchu od teploty pri konštantnom atmosférickom tlaku.

Tabuľka 5.2 Teplotná závislosť  $\epsilon_r$  vzduchu

Teplota		
°C	K	$\epsilon_r$
+ 60	333	1,00052
+ 20	293	1,00058
- 60	213	1,00081

### 5.4.2 Permitivita kvapalných izolantov

Pri kvapalných izolantoch je potrebné rozlišovať, či ide o nepolárne alebo polárne, dipólové kvapalné izolanty.

V nepolárnych kvapalných izolantoch sa vyskytuje len elektrónová polarizácia, a preto:

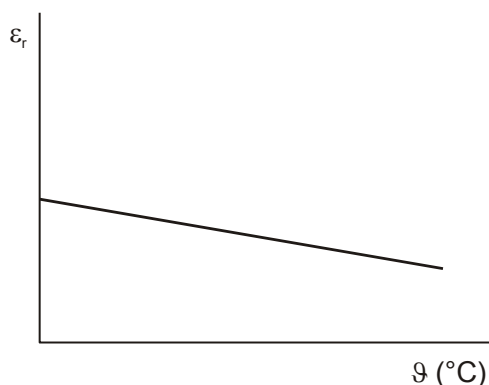
1. Veľkosť relatívnej permitivity obyčajne neprevyšuje hodnotu 2,5.
2. Relatívna permitivita nezávisí od frekvencie.
3. Polarizovateľnosť molekúl je teplotne nezávislá. Relatívna permitivita so vzrastom teploty klesá len nepatrne.

V Clausius - Mossottiho rovnici

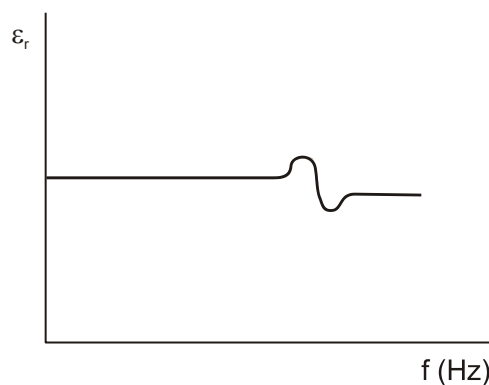
$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n\alpha_e}{3\epsilon_0} \quad (5.20)$$

ktorá platí pre nepolárne kvapalné izolanty, sa s teplotou mení len počet častíc (počet indukovaných dipólových momentov) v jednotke objemu  $n$  ( $m^3$ ) v dôsledku tepelnej rozťažnosti.

Keďže elektrónová polarizovateľnosť  $\alpha_e$  je od teploty a frekvencie elektrického poľa nezávislá, možno teplotnú, resp. frekvenčnú závislosť relatívnej permitivity znázorniť ako na obr. 5.4 resp. obr. 5.5. Pokles relatívnej permitivity s teplotou súvisí s poklesom koncentrácie polarizujúcich sa častíc s teplotou v dôsledku tepelnej rozťažnosti izolantu. Relatívna permitivita je až do frekvencie rádovo  $10^{13}$  Hz frekvenčne nezávislá, pričom frekvenčná závislosť permitivity znázornená na obr. 5.5 súvisí s elektrónovou rezonančnou polarizáciou (v oblasti frekvencií rádovo  $10^{14}$  Hz).



Obr. 5.4. Teplotná závislosť relatívnej permitivity nepolárnych kvapalných izolantov

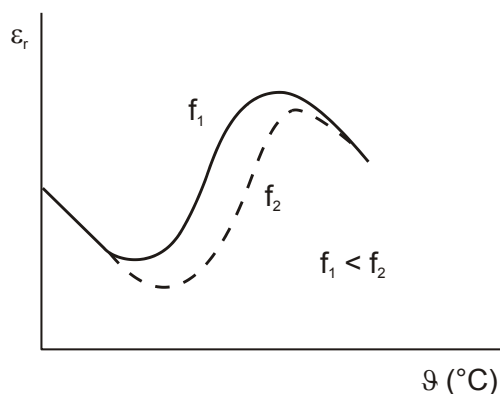


Obr. 5.5. Frekvenčná závislosť relatívnej permitivity nepolárnych kvapalných izolantov

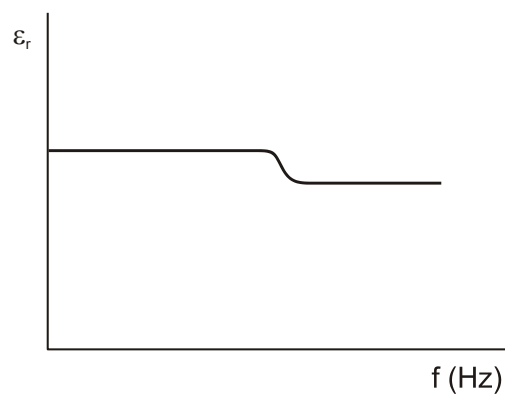
Polárne kvapalné izolanty majú elektrónovú a dipólovú polarizáciu. Ich relatívna permitivita je tým väčšia, čím väčší je dipólový moment ich molekúl, čím rýchlejšie sa tieto molekuly pohybujú v elektrickom poli a čím viac molekúl je v jednotke objemu. Pohyblivosť molekúl súvisí s viskozitou a teplotou. S ohľadom na silné vzájomné pôsobenie molekúl možno teplotnú závislosť relatívnej permitivity v týchto izolantoch znázorniť ako na obr. 5.6. Parametrom je na tomto obrázku frekvencia elektrického poľa. Pri dostatočne nízkych



teplotách sa dipólové molekuly v elektrickom poli nemôžu otáčať - dipólová polarizácia sa neuplatňuje a kvapalný izolant sa správa ako nepolárny. Od určitej teploty sa dipólové molekuly začínajú v elektrickom poli orientovať a relatívna permitivita s teplotou začína stúpať. Aj keď so stúpajúcou teplotou sa podmienky pre rotačný pohyb dipólových molekúl neustále zlepšujú, má permitivita v teplotnej závislosti maximum. Toto maximum súvisí s tepelným chaotickým pohybom dipólových molekúl, ktorý nad teplotou maxima permitivity začína byť prevládajúci nad usporiadajúcim pohybom dipólových molekúl v dôsledku elektrického poľa.



Obr. 5.6 Závislosť relatívnej permitivity dipólových kvapalných izolantov. Parametrom je frekvencia elektrického poľa



Obr. 5.7 Frekvenčná závislosť relatívnej permitivity v dipólových kvapalných izolantoch

Frekvenčná závislosť relatívnej permitivity v dipólových kvapalných izolantoch je znázornená na obr. 5.7. Charakter tejto závislosti je daný frekvenčnou a teplotnou závislosťou dipólovej a elektrónovej polarizácie. Pokles permitivity v určitom frekvenčnom intervale pri danej teplote súvisí so znižujúcim sa príspevkom od dipólovej polarizácie (dipólové molekuly nestačia sledovať zmenu frekvencie elektrického poľa), pričom dipólová polarizácia pri určitej frekvencii zanikne (nad touto frekvenciou sa uplatňuje iba elektrónová polarizácia).

### 5.4.3 Permitivita tuhých izolantov

V tuhých izolantoch sa môžu uplatňovať viaceré polarizácie, a to podľa zloženia a štruktúry daného izolantu.

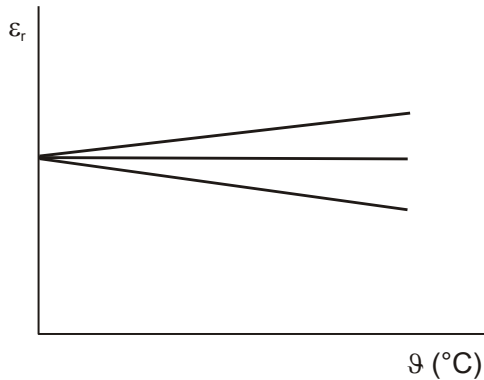
V *nepolárnych tuhých izolantoch* sa vyskytuje iba elektrónová polarizácia, preto závislosti relatívnej permitivity od teploty a frekvencie elektrického poľa sú v zásade rovnaké ako pre nepolárne kvapalné izolanty (obr. 5.4 a obr. 5.5). V nehomogénnych tuhých nepolárnych izolantoch sa okrem elektrónovej polarizácie môže uplatniť aj migračná polarizácia.

V *dipólových tuhých izolantoch* sa vyskytuje elektrónová a dipólová polarizácia v dôsledku čoho závislosť relatívnej permitivity od teploty a frekvencie má rovnaký charakter ako pri kvapalných dipólových izolantoch (obr. 5.6 a obr. 5.7). V tuhých dipólových izolantoch sú však uvedené závislosti menej výrazné s ohľadom na väčší rozptyl relaxačných časov dipólových molekúl. V nehomogénnych tuhých dipólových izolantoch sa k uvedeným polarizáciám môže pridružiť aj migračná polarizácia.

V *iónových kryštalických látkach* sa vyskytuje elektrónová a iónová pružná polarizácia.

Pretože pružne viazané ióny stačia sledovať frekvenciu elektrického poľa až do frekvencie rádovo  $10^{12}$  Hz, relatívna permitivita v technicky používanom frekvenčnom intervale je od frekvencie nezávislá (obr. 5.8). Teplotnú závislosť relatívnej permitivity v iónových kryštalických látkach možno znázorniť obr. 5.9. Charakter tejto závislosti je určený tým, či so stúpajúcou teplotou je významnejší vzrast iónovej pružnej polarizácie v

dôsledku oslabenia príťažlivých síl medzi iónmi, alebo jej pokles zapríčinený znížením koncentrácie iónov s teplotou. Pri nezávislosti permitivity od teploty sú obidva uvedené javy v rovnováhe.



Obr. 5.8 Teplotná závislosť relatívnej permitivity iónových kryštalických látok

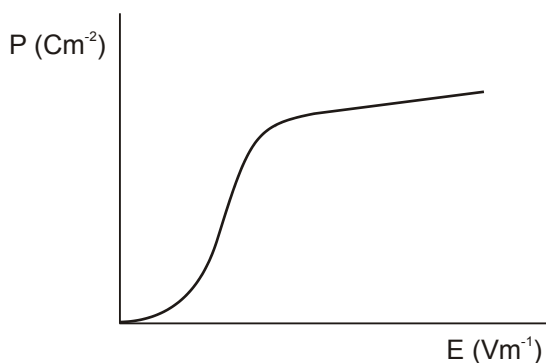


Obr. 5.9 Frekvenčná závislosť relatívnej permitivity iónových kryštalických látok

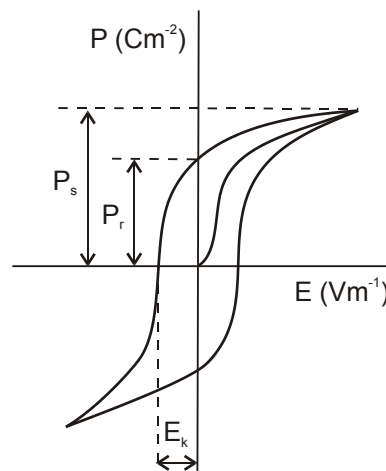
V iónových kryštalických látkach sa vyskytuje elektrónová a iónová pružná polarizácia. Pretože pružne viazané ióny stačia sledovať frekvenciu elektrického poľa až do frekvencie rádovo  $10^{12}$  Hz, relatívna permitivita v technicky používanom frekvenčnom intervale je od frekvencie nezávislá (obr. 5.8). Teplotnú závislosť relatívnej permitivity v iónových kryštalických látkach možno znázorniť ako na obr. 5.9. Charakter tejto závislosti je určený tým, či so stúpajúcou teplotou je vyšší vzrast iónovej pružnej polarizácie v dôsledku oslabenia príťažlivých síl medzi iónmi, alebo jej pokles zapríčinený znížením koncentrácie iónov s teplotou. Pri nezávislosti permitivity od teploty sú obidva uvedené javy v rovnováhe.

V iónových sklovitých látkach patrí k základným polarizáciám elektrónová, iónová, relaxačná a iónová pružná polarizácia. S ohľadom na relaxačný charakter iónovej relaxačnej polarizácie by mali byť závislosti permitivity od teploty a frekvencie v zásade rovnaké ako pri dipólových kvapalných izolantoch. Ukazuje sa však, že permitivita nemá v teplotnej závislosti maximum, resp. že toto maximum je nevýrazné. Tento fakt súvisí s tým, že s teplotou rastie koncentrácia iónov zúčastňujúcich sa na iónovej relaxačnej polarizácii.

Vo feroelektrikách sa vyskytuje elektrónová, iónová pružná a spontánna polarizácia. S ohľadom na spontánnu polarizáciu a doménovú štruktúru sú tieto dielektriká výrazne nelineárne, t.j. závislosť vektora polarizácie od intenzity elektrického poľa je nelineárna (obr. 5.10).



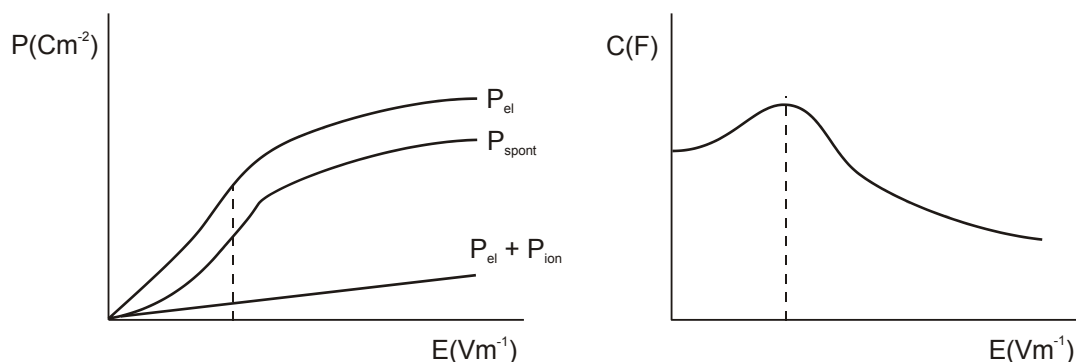
Obr. 5.10 Závislosť vektora polarizácie feroelektrík od intenzity elektrického poľa



Obr. 5.11 Hysterézná slučka feroelektrického materiálu

Pri postupnom zvyšovaní a následnom znižovaní intenzity elektrického poľa a jej ďalšom zvyšovaní v opačnom smere, po ktorom znova nasleduje jej znižovanie atď. až po uzavretie cyklu, sa pohybujeme po hysteréznej slučke, znázornenej na obr. 5.11. Závislosti znázornené na obr. 5.10 a obr. 5.11 možno ľahko kvalitatívne interpretovať na základe existencie domén (oblasti, ktoré sú spontánne polarizované) a kinetiky ich rozhraní (stien) vo vonkajšom elektrickom poli. Po vložení feroelektrika do vonkajšieho elektrického poľa sa začínajú posúvať steny medzi doménami tak, že objem domén, ktoré majú vektor spontánnej polarizácie orientovaný do smeru vonkajšieho elektrického poľa sa zväčšuje na úkor tých domén, v ktorých smer spontánnej polarizácie je iný. Pri určitej intenzite elektrického poľa steny medzi doménami zanikajú a vzniká jednodoménový kryštál. Pri ďalšom zvyšovaní intenzity elektrického poľa sa už príspevok od spontánnej polarizácie k celkovej polarizácii nemení a ďalší rast vektora polarizácie je lineárny, pričom ho podmieňuje elektrónová a iónová pružná polarizácia. Extrapoláciou tejto lineárnej časti na nulové elektrické pole  $E$  dostaneme hodnotu spontánnej polarizácie  $P_s$  (obr. 5.11). Pri  $E = 0$  feroelektrický kryštál vykazuje remanentnú (zvyškovú) polarizáciu  $P_r$ , na ktorej zrušenie potrebujeme priložiť na kryštál intenzitu elektrického poľa  $E_k$  (tzv. koercitívne elektrické pole) v opačnom zmysle, aký malo elektrické pole  $E$ , ktoré feroelektrikum spolarizovalo až do nasýtenia (uvedené veličiny sa vzťahujú na maximálnu hysteréznú slučku, obr. 5.11).

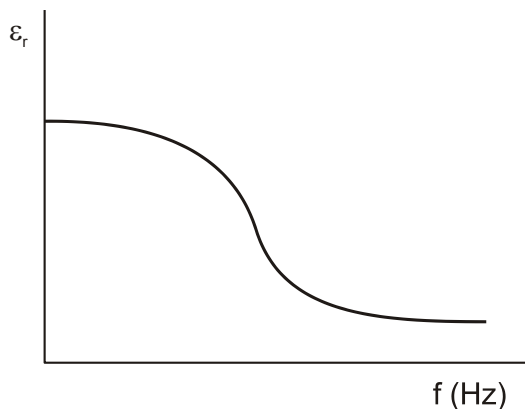
S ohľadom na nelineárnu závislosť vektora polarizácie od intenzity elektrického poľa je relatívna permitivita feroelektrika závislá od intenzity elektrického poľa (obr. 5.12), pričom takýto charakter závislosti vyplýva z obr. 5.10.



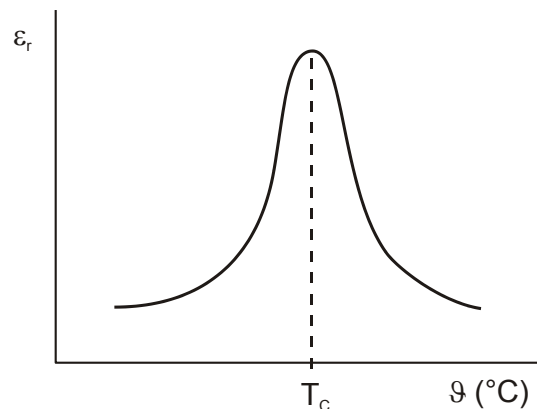
Obr. 5.12 Napätové závislosti polarizácie  $P$  a kapacity kondenzátora  $C$  s nelineárnym dielektrikom

Frekvenčná závislosť relatívnej permitivity feroelektrík je v podstate rovnaká ako pri dipólových kvapalných a tuhých izolantoch, pričom ju určuje kinetika doménových stien v striedavom elektrickom poli (obr. 5.13).

Teplotná závislosť relatívnej permitivity feroelektrík je znázornená na obr. 5.14. Uvedený priebeh je podmienený teplotnou závislosťou pohyblivosti stien medzi doménami v elektrickom poli, resp. zánikom domén a tým aj spontánnej polarizácie nad určitou charakteristickou teplotou, tzv. Curieho teplotou ( $T_c$ ). Nad Curieho teplotou (teplota fázového prechodu) sa stávajú feroelektriká paraelektrikami a závislosť relatívnej permitivity od teploty sa riadi Curieho - Weissovým zákonom, teda relatívna permitivita so vzrastom teploty hyperbolicky klesá.



Obr. 5.13 Frekvenčná závislosť relatívnej permitivity feroelektrík



Obr. 5.14 Teplotná závislosť relatívnej permitivity feroelektrík

Existuje niekoľko sto druhov feroelektrických materiálov. Medzi najčastejšie používané feroelektriká patrí:

Názov	vzorec	T <sub>c</sub> (°C)
Titaničitán bárnatý	BaTiO <sub>3</sub>	135
Titaničitán olovnatý	PbTiO <sub>3</sub>	490
Niobičitán draselný	KNbO <sub>3</sub>	435
Niobičitán lítny	LiNbO <sub>3</sub>	1 210
Tantalát lítny	LiTaO <sub>3</sub>	665
Hydrofosforečnan draselný	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	- 150

#### 5.4.3.1 Pamäte počítačov odolné proti výpadku napájania

Pamäte počítačov odolné proti výpadku napájania sú materiály na báze feroelektrík v tvare tenkých vrstiev titanátov (BaTiO<sub>3</sub>, PbZrTiO<sub>3</sub>), ktoré umožňujú vytvoriť feroelektrické kondenzátory priamo na čipe polovodičovej pamäte. Vhodným zapojením získame permanentnú pamäť, ktorá počas niekoľkých dní po vypnutí napájania si zachováva informácie. Priebeh spontánnej polarizácie na priloženom napätí v tvare hysteréznej slučky je podobná ako u klasických feromagnetov.

Ak vonkajšie napätie  $U$  bude väčšie ako  $U_c$ , feroelektrikum prejde do nasýteného stavu charakterizovaného tým, že pri následnom vypnutí ( $U = 0$ ) sa feroelektrikum bude nachádzať v jednom zo stabilných stavov s polarizáciou  $P_s$ . Tieto stavy odpovedajú logickej 1 resp. logickej 0. Ak sa kondenzátor realizuje na ploche niekoľko  $\mu\text{m}^2$  a na hrúbke menšej ako  $0,5 \mu\text{m}$ , zmena stavu prebieha pri  $U \geq 2\text{V}$  v čase menšom ako  $10 \text{ ns}$ .

Aby bolo možné dosiahnuť čo najväčšiu hustotu integrácie, je feroelektrický kondenzátor nanosený priamo na jednu z elektród tranzistoru MOS. Ďalším zlepšovaním technológie výroby feroelektrických vrstiev bude možné vytvoriť „ideálnu pamäť“ spájajúcu prednosti DRAM a permanentných feroelektrických pamätí.

### 5.5 Dielektrické straty

Po vložení dielektrika alebo izolantu do elektrického poľa sa v tomto materiáli určité časť energie premieňa na neúčinné teplo. Táto energia sa nazýva dielektrické straty. Následkom dielektrických strát sa materiál ohrieva.

Dielektrické straty izolantov predstavujú elektrickú energiu, ktorá sa v danom objeme izolantu premení za jednotku času na iný druh energie, spravidla na energiu tepelnú. Dielektrické straty sú s výnimkou elektrického ohrevu nežiaduce. Oteplením dielektrík a izolantov dochádza k zhoršeniu ich funkčných vlastností. V niektorých prípadoch sú

dielektrické straty užitočné. Možno ich využiť napr. na sušenie niektorých látok s dielektrickou povahou.

V jednosmernom elektrickom poli sú dielektrické straty spôsobené vodivosťou materiálu. Pri striedavom elektrickom poli sa okrem vodivostnej zložky dielektrických strát vyskytuje aj polarizačná a ionizačná zložka. Niektoré druhy polarizácie sú spojené s dielektrickými stratami. Ionizačné procesy v dutinkách izolácie tiež spôsobujú dielektrické straty.

Z fyzikálneho hľadiska možno dielektrické straty rozdeliť na tri hlavné druhy:

- vodivostné,
- polarizačné,
- ionizačné.

Predpokladá sa, že celkové dielektrické straty sú dané súčtom všetkých troch druhov strát. Vodivostné dielektrické straty sa vyskytujú vo všetkých izolantoch. Polarizačné dielektrické straty sa vyskytujú v tých izolačných materiáloch, v ktorých sa vyskytujú stratové polarizácie, t.j. relaxačné polarizácie, polarizácia migračná, spontánna a rezonančná. Polarizačné dielektrické straty sú zapríčinené oneskorením pohybu viazaných elektrických nábojov za zmenami vo veľkosti intenzity elektrického poľa. Ionizačné dielektrické straty sa vyskytujú v plynach pri napätiach prevyšujúcich ionizačné napätie. Vyskytuje sa aj v plynových dutinách izolantov.

Dielektrické straty v harmonickom striedavom elektrickom poli vypočítame podľa:

$$p = UI \cos \varphi \cong U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (5.21)$$

kde P je stratový výkon (W),  
 U efektívna hustota napätia na dielektriku (V),  
 I efektívna hodnota prúdu prechádzajúceho dielektrikom (A),  
 $\varphi$  je fázový uhol ( $^\circ$ ),  
 $\delta$  je uhol dielektrických strát,  
 $\operatorname{tg} \delta$  stratový činiteľ.

Stratový uhol  $\delta$  predstavuje doplnok do  $90^\circ$  k uhlu fázového posunu  $\varphi$ , ktorým prúd predbieha napätie. V praxi charakterizujeme dielektrické straty *stratovým činiteľom*  $\operatorname{tg} \delta$  – *mierou dielektrických strát* a ukazovateľom kvality dielektrík, daný pomerom činnej a jalovej zložky prúdu:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_w}{I_j} \quad (5.22)$$

Výraz  $\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$  je stratové číslo (bezrozmerné číslo), ktorým charakterizujeme kvalitu izolantu a ktoré možno jednoducho experimentálne odmerať.

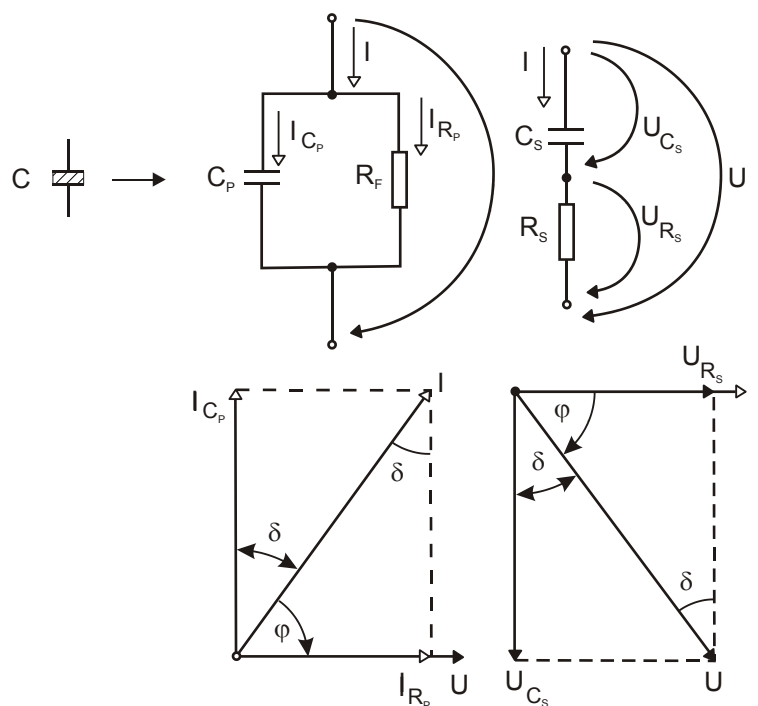
$$\text{Stratové číslo} = \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta \quad (5.23)$$

Činiteľ dielektrických strát  $\operatorname{tg} \delta$  je bezrozmerná veličina. Číselne sa vyjadruje desatinným číslom (napr. 0,0002), násobkom mocniny desiatky so záporným exponentom (napr.  $2 \cdot 10^{-4}$ ) alebo v percentách (napr. 0,02%). Činiteľ dielektrických strát sa u dielektrík pohybuje v rozmedzí  $10^{-5}$  až  $10^{-1}$ . Hodnotu  $10^{-5}$  má vzduch. Bežne používané dielektriká majú súčiniteľ dielektrických strát v rozmedzí  $10^{-4}$  až  $10^{-1}$ .

Pre ozrejmienie zmyslu využívania  $\operatorname{tg} \delta$  sa vychádza z náhradných schém technického kondenzátora, ktorý je vytvorený dielektrikom s mernými elektródami. V praxi sa najčastejšie

používa paralelná a sériová náhradná schéma technického kondenzátora s ideálnymi obvodovými prvkami kapacitou a odporom (obr. 5.15).

Vodivostné dielektrické straty sa vyskytujú vo všetkých dielektrikách. Polarizačné (relaxačné) dielektrické straty súvisia s pohybom viazaných elektrických nábojov, oneskoreným za zmenami elektrického poľa. Najvýznamnejšie sú dipólové, vyskytujúce sa pri striedavom napätí, nie však vo všetkých dielektrikách. Ionizačné dielektrické straty sa vyskytujú v plynoch v silnom elektrickom poli počas nárazovej ionizácie. Významné sú pri stratách koróziou pri vysokonapäťovom prenose elektrickej energie. Neprípustné veľké dielektrické straty v izolačnom materiály spôsobujú silné zohriatie izolácie v dôsledku a môžu spôsobiť jeho deštrukciu. Dielektrické straty v izoláciách a v dielektriku kondenzátorov v rezonančných obvodoch zvyšujú tlmenie. Dielektrické straty plynov v slabých elektrických poliach, nepolárnych kvapalných (transformátorový olej) a tuhých (polyetylén, polystyrén) dielektrík sú len vodivostné, u polárnych kvapalných a tuhých (guma, polyvinylchlorid) sú dielektrické straty vodivostné a polarizačné. Dielektrické straty závisia od teploty, napätia, frekvencie, permitivity a stratového činiteľa.



Obr. 5.15 Náhradné schémy technického kondenzátora s vektorovými diagramami  
a) paralelná náhrada a b) sériová náhrada

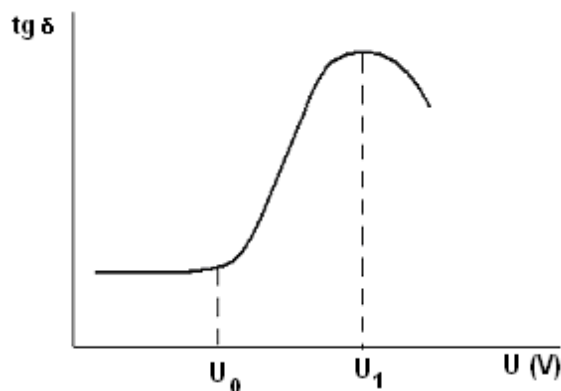
Vo všeobecnosti dielektrické straty v izolantoch zapríčiňuje vodivosť izolantov (vodivostné straty), stratové polarizácie uplatňujúce sa v izolantoch (polarizačné dielektrické straty), a pri napätí, pri ktorom nastáva ionizácia plynových dutín v izolante, aj ionizačné dielektrické straty. Keďže mechanizmus dielektrických strát v rozličných skupenstvách je rozličný, preberieme postupne dielektrické straty v týchto skupenstvách.

### 5.5.1 Dielektrické straty v plyných izolantoch

Dielektrické straty v plyných izolantoch sú zapríčinené ich elektrickou vodivosťou. Pohyb viazaných nábojov v plyných izolantoch nie je spojený s dielektrickými stratami. Vodivostná zložka strát je rozhodujúca aj v dipólových plyných izolantoch, pretože zložka dielektrických strát, ktorá je spojená s dipólovou polarizáciou, je v plynom skupenstve zanedbateľná. Závislosť stratového činiteľa  $\text{tg}\delta$  od frekvencie elektrického poľa je v plyných izolantoch hyperbolicky klesajúca so vzrastom frekvencie, pretože vodivosť plynov je frekvenčne nezávislá. Teplotná závislosť stratového činiteľa je daná teplotnou závislosťou

vodivosti a relatívnej permitivity plynov, pričom je potrebné pri týchto závislostiach uvážiť, či ide o konštantný tlak alebo o konštantný objem plyných izolantov.

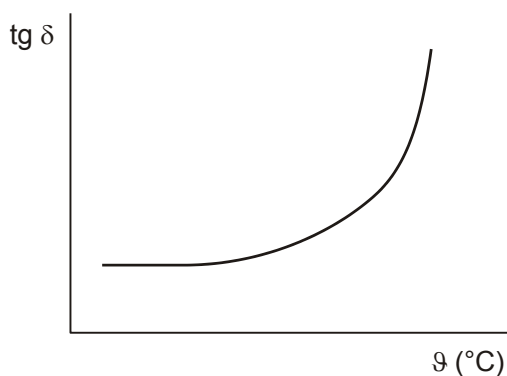
Na obr. 5.16 je závislosť činiteľa dielektrických strát  $\text{tg } \delta$  od napätia pre tuhý izolant obsahujúci dutinky. Táto závislosť je ionizačná krivka a v technickej praxi sa využíva na posúdenie kvality izolácie elektrických strojov. Pri vzraste napätia nad hodnotu ionizačného napätia  $U_0$ ,  $\text{tg } \delta$  vzrastá, pri napätí  $U > U_1$ , kedy je vzduch v dutinkách izolantu plne ionizovaný,  $\text{tg } \delta$  klesá.



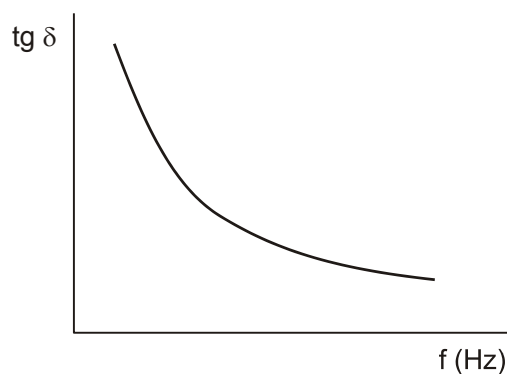
Obr. 5.16 Závislosť činiteľa dielektrických strát  $\text{tg } \delta$  od napätia pre tuhý izolant obsahujúci dutinky

### 5.5.2 Dielektrické straty v kvapalných izolantoch

V nepolárnych kvapalných izolantoch sa vyskytuje iba elektrónová polarizácia, ktorá v oblasti "elektrotechnických" frekvencií je bezstratová. Preto sa v týchto izolantoch vyskytujú iba vodivostné dielektrické straty. Keďže elektrická vodivosť izolantov s teplotou exponenciálne rastie, rastie aj  $\text{tg } \delta$  exponenciálne s teplotou (obr. 5.17). So vzrastom frekvencie  $\text{tg } \delta$  klesá (obr. 5.18).



Obr. 5.17 Teplotná závislosť stratového činiteľa nepolárnych kvapalných izolantov



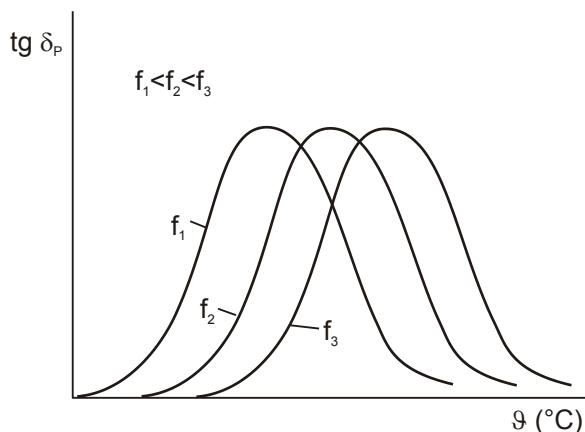
Obr. 5.18 Frekvenčná závislosť stratového činiteľa nepolárnych kvapalných izolantov

Elektrická vodivosť nepolárnych kvapalných izolantov spôsobujú voľné elektrické náboje, ióny, ktoré vznikajú polarizáciou polárnych nečistôt, t.j. látok s iónovou alebo silne polárnou väzbou. Preto aj veľkosť dielektrických strát a stratového činiteľa závisí od stupňa čistoty izolačnej kvapaliny.

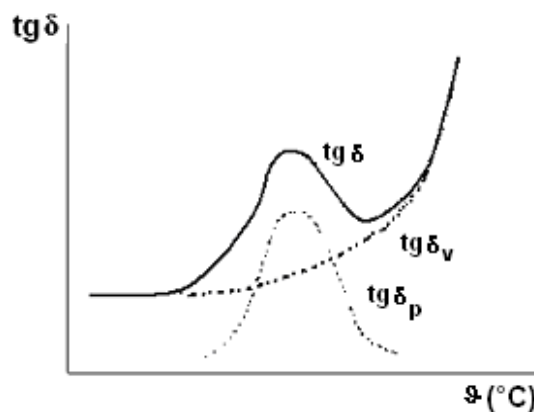
V dipólových kvapalných izolantoch sa v určitej oblasti teplôt a frekvencií elektrického poľa môže uplatniť okrem elektrónovej polarizácie aj dipólová polarizácia. Preto sa v týchto izolantoch vyskytujú vodivostné a polarizačné dielektrické straty (polarizačné dielektrické straty sú spojené s dipólovou relaxačnou polarizáciou).

Závislosť vodivostnej zložky  $\text{tg } \delta$  od teploty a frekvencie má rovnaký charakter ako pre nepolárne kvapalné izolanty. Závislosť polarizačnej zložky  $\text{tg } \delta$  od teploty, pri rozličných

frekvenciách elektrického poľa, je znázornená na obr. 5.19. Priebeh tejto závislosti súvisí s otáčaním sa dipólov v časovo premennom elektrickom poli, pričom pri určitej teplote vykazuje  $\text{tg} \delta$  maximálnu hodnotu. Súvisí to s tým, že v oblasti veľmi nízkych teplôt sú dipólové molekuly nepohyblivé a ich pohyb vyvolaný elektrickým potom sa začína iba od určitej teploty. Pohyb dipólových molekúl podmieňuje polarizačnú zložku dielektrických strát  $\text{tg} \delta_p$ , ktorá je väčšia vtedy, ak sa dipólové molekuly pohybujú v dostatočne viskóznom prostredí. Pri ďalšom zvyšovaní teploty sú dipólové molekuly pri pohybe menej brzdené prostredím, čo vedie k znižovaniu  $\text{tg} \delta_p$  s teplotou.



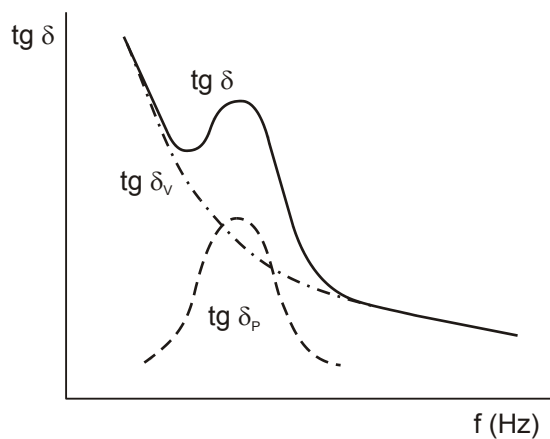
Obr. 5.19 Závislosť polarizačnej zložky  $\text{tg} \delta_p$  od teploty v dipólových kvapalných izolantov, ak parametrom je frekvencia



Obr. 5.20 Závislosť stratového činiteľa  $\text{tg} \delta$  od teploty v dipólových kvapalných izolantov

Celkový stratový činiteľ  $\text{tg} \delta$  v závislosti od teploty je daný súčtom vodivostnej  $\text{tg} \delta_v$  a polarizačnej zložky  $\text{tg} \delta_p$  stratového činiteľa ( $\text{tg} \delta = \text{tg} \delta_p + \text{tg} \delta_v$ ) a možno ho znázorniť ako na obr. 5.20.

Frekvenčná závislosť  $\text{tg} \delta$  je znázornená na obr. 5.21.



Obr. 5.21 Frekvenčná závislosť stratového činiteľa dipólových kvapalných izolantov

Aj táto závislosť je daná súčtom vodivostnej a polarizačnej zložky stratového činiteľa. Závislosť vodivostnej zložky  $\text{tg} \delta_v$  od frekvencie je rovnaká ako v nepolárnych kvapalných izolantoch. Polarizačná zložka stratového činiteľa  $\text{tg} \delta_p$  má vo frekvenčnej závislosti jasne vyjadrené maximum, ktoré sa pri vyšších teplotách posúva smerom k vyšším frekvenciám elektrického poľa. Závislosť  $\text{tg} \delta_p$  od frekvencie súvisí s pohybom dipólových molekúl v striedavom elektrickom poli. Pri nulovej frekvencii sa dipólové molekuly neotáčajú, preto zložka  $\text{tg} \delta_p$  je nulová. Podobne aj pri veľmi vysokých frekvenciách sa dipólové molekuly



neotáčajú, pretože nestačia sledovať zmenu frekvencie elektrického poľa (dipólová polarizácia sa nerealizuje), takže  $\text{tg}\delta_p = 0$ . Maximálna hodnota  $\text{tg}\delta_p$  sa dosahuje približne pri frekvencii elektrického poľa, ktorá je rovná prevrátenej hodnote relaxačného času dipólovej polarizácie.

### 5.5.3 Dielektrické straty v tuhých izolantoch

V tuhých izolantoch sa vo všeobecnosti môžu uplatňovať vodivostné, polarizačné a ionizačné dielektrické straty. Vodivostné dielektrické straty sa vyskytujú vo všetkých tuhých izolantoch, polarizačné dielektrické straty sa uplatňujú iba v tých tuhých izolantoch, v ktorých sa vyskytujú stratové polarizácie. Ionizačné dielektrické straty sú typické pre tuhé izolanty, ktoré obsahujú plynové, resp. vzduchové dutinky a vyskytujú sa iba pri napätiach, pri ktorých nastáva ionizácia plynu v týchto dutinkách.

V ďalšom odseku preberieme tuhé izolanty z hľadiska dielektrických strát podľa rozdelenia, ktoré sme viedli v odseku venovanému polarizácii tuhých izolantov. Budeme pritom predpokladať, že izolanty sú homogénne a neobsahujú nijaké plynové dutinky. V prípade nehomogénnych izolantov s plynovými dutinkami sa k základným dielektrickým stratám v týchto skupinách pridružujú aj dielektrické straty zapríčinené migračnou polarizáciou, resp. pri ionizačných napätiach aj ionizačné dielektrické straty. Pri rezonančných frekvenciách vzniknú aj rezonančné dielektrické straty, zapríčinené rezonančnými polarizáciami.

V *nepolárnych tuhých izolantoch* sa vyskytuje iba elektrónová polarizácia, preto sa v nich uplatňujú len vodivostné dielektrické straty. Závislosť  $\text{tg}\delta$  od frekvencie elektrického poľa a teploty je v nich rovnaká, ako v nepolárnych kvapalných izolantoch.

V *dipólových tuhých izolantoch* sa uplatňuje elektrónová a dipólová polarizácia, preto závislosť stratového činiteľa od teploty a frekvencie je v zásade rovnaká, ako v dipólových kvapalných izolantoch. Závislosti stratového činiteľa  $\text{tg}\delta$  od teploty a frekvencie sú však v dipólových tuhých izolantoch o niečo menej výrazné, ako analogické závislosti v kvapalných dipólových izolantoch, čo súvisí s väčším rozptylom relaxačných časov jednotlivých dipólových molekúl.

V *iónových kryštalických látkach* sa uplatňuje elektrónová a iónová pružná polarizácia. Keďže tieto polarizácie sú v oblasti "elektrotechnických" frekvencií bezstratové, vyskytujú sa v nich iba vodivostné dielektrické straty. Závislosti stratového činiteľa  $\text{tg}\delta$  od teploty a frekvencie sú v nich rovnaké, ako v nepolárnych tuhých izolantoch.

V *iónových sklovitých látkach* sa vyskytuje elektrónová a iónová relaxačná polarizácia. Keďže iónová relaxačná polarizácia je spojená s dielektrickými stratami, existujú v nich vodivostné a polarizačné dielektrické straty. Závislosť stratového činiteľa od frekvencie v iónových sklovitých látkach je v zásade rovnaká, ako v dipólových tuhých izolantoch. V teplotnej závislosti stratového činiteľa sa však spravidla nepozoruje maximum, resp. maximum je nevýrazné. Súvisí to s tým, že koncentrácia iónov zúčastňujúcich sa na iónovej relaxačnej polarizácii exponenciálne rastie s teplotou, čo má za následok aj exponenciálny rast polarizačnej zložky  $\text{tg}\delta$  s teplotou.

*Feroelektriká* sa vyznačujú elektrónovou, iónovou pružnou a spontánnou polarizáciou. Spontánna polarizácia je spojená so značnými dielektrickými stratami, pretože kinetika doménových stien v časovo premennom elektrickom poli je energeticky náročná. Preto sa vo feroelektrikách vyskytujú vodivostné a polarizačné dielektrické straty. Vodivostná zložka stratového činiteľa  $\text{tg}\delta$  je analogická, ako v nepolárnych tuhých izolantoch. Polarizačná zložka stratového činiteľa  $\text{tg}\delta_p$ , má v teplotnej a frekvenčnej závislosti jasne vyjadrené polarizačné maximum, ktoré súvisia s relaxačným charakterom spontánnej polarizácie (uvedené závislosti sú v zásade rovnaké ako v dipólových tuhých izolantoch). Nad Curieho teplotou sa vo feroelektrikách vyskytujú iba vodivostné dielektrické straty, pretože spontánna polarizácia nad touto teplotou zaniká.

## 5.6 Komplexná permitivita

Vlastnosti reálnych dielektrík *pri striedavom napätí* je účelné vyjadriť pomocou komplexnej permitivity.

**Reálna zložka komplexnej permitivity** je vlastná (relatívna) permitivita, ktorá je mierou kapacitného charakteru dielektrika.

**Imaginárna zložka komplexnej permitivity** je mierou strát v dielektriku v striedavom elektrickom poli a nazýva sa tiež stratovým číslom.

## 5.7 Elektrická vodivosť izolantov

V rôznych teoretických úvahách [13, 27] sa môžeme stretnúť s pojmom ideálny izolant a ideálne dielektrikum. Sú to látky, ktoré neobsahujú žiadne voľné nosiče náboja a sú teda dokonalé nevodiče. Takéto látky, ktoré neobsahujú žiadne nosiče náboja v skutočnosti neexistujú. Všetky skutočné izolanty a dielektriká obsahujú určité množstvo nosičov nábojov, a preto majú merateľnú rezistivitu, resp. vodivosť.

Vo všeobecnosti charakterizuje usporiadaný pohyb elektrických nábojov v látke pri pôsobení vonkajšieho elektrického poľa. Merná vnútorná elektrická vodivosť predstavuje smernicu priamky  $\sigma$  z Ohmového zákona určenej v diferenciálnom tvare:

$$J = \sigma E = neuE = e \sqrt{\frac{g}{r}} (u_+ + u_-) E \quad (5.35)$$

kde  $u = v/E$  je pohyblivosť určená z rýchlosti náboja pri jednotkovej intenzite elektrického poľa.

Reálne izolanty obsahujú malé množstvo voľných nosičov náboja, spôsobujúcich určitú vodivosť. *V slabých elektrických poliach sú voľnými nosičmi spravidla voľné ióny, vznikajúce disociáciou, resp. aktiváciou častíc prímiesí a nečistôt.* Silné elektrické pole urýchľuje voľné nosiče náboja natoľko, že pri nárazoch ionizujú neutrálne častice izolantu. Prekročením kritickej intenzity elektrického poľa nastáva prudké zväčšenie koncentrácie voľných nosičov náboja, prieraz izolantu.

Voľné nosiče náboja v izolantoch a dielektrikách vznikajú odlišne v slabých a v silných elektrických poliach. Fyzikálny dej vedenia elektrického prúdu prebieha odlišne v plyných, kvapalných a tuhých izolantoch a dielektrikách. V elektrických poliach s malou intenzitou je vznik voľných nosičov náboja vo väčšine izolantov a dielektrík spôsobený ionizáciou, prípadne disociáciou nečistôt a prímiesí. Podmienky pre tieto procesy sú všeobecne tým priaznivejšie, čím väčšia je relatívna permitivita a čím vyššia je teplota. Vodivosť väčšiny izolantov a dielektrík má iónový charakter.

### 5.7.1 Elektrická vodivosť plyných izolantov

Plyny sú výbornými izolantmi v slabých elektrických poliach. Nosičmi náboja v plynách sú:

- **Voľné ióny**, ktoré vznikajú v dôsledku žiarenia.
- **Voľné elektróny**.

Schopnosť molekúl zachytávať elektróny na molekulách majú tzv. **elektronegatívne plyny** ( $\text{SF}_6$ ). V slabých elektrických poliach existuje **nesamostatná** elektrická vodivosť (vonkajšie ionizačné činitele). V silných elektrických poliach existuje **samostatná** elektrická vodivosť (nárazová ionizácia a prieraz plynu).

Ak si označíme  $g$  ako koeficient generácie a  $r$  ako koeficient rekombinácie (rekombinácia elektrónová, iónová, na neutrálnych molekulách a pod.), potom sa koncentrácia nosičov nábojov  $n$  vypočíta zo vzťahu:

$$n = \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (5.36)$$

Rýchlosť rekombinácie možno vypočítať ako

$$\frac{dn}{dt} = -rn^2 \quad (5.37)$$

Prúdová hustota sa vypočíta ako

$$J = e(n_+u_+ + n_-u_-)E \quad (5.38)$$

kde:  $n_+$ ,  $n_-$  sú koncentrácie kladných a záporných iónov ( $m^{-3}$ ),  
 $u_+$ ,  $u_-$  sú pohyblivosti kladných a záporných iónov ( $m^2V^{-1}s^{-1}$ ),  
 $E$  je intenzita elektrického poľa (V/m).

*Voltampérová charakteristika plynných izolantov:*

Nech medzi dvoma doskovými elektródami s plochou  $S$  a vzdialenosťou medzi nimi  $d$  sa nachádza plynný izolant, napr. vzduch. Ak na elektródy pripojíme vonkajšie jednosmerné napätie, začne obvodom tiecť elektrický prúd, ktorého závislosť od napätia možno odvodiť na základe rovnováhy medzi počtom vznikajúcich a zanikajúcich nosičov náboja. V elektrickom poli je generácia voľných nosičov náboja v podstate rovnaká ako bez elektrického poľa, pokiaľ nenastáva nárazová ionizácia. Zánik voľných nosičov náboja však v tomto prípade nastáva tak v objeme plynu objemovou rekombináciou, ako aj neutralizáciou na elektródach.

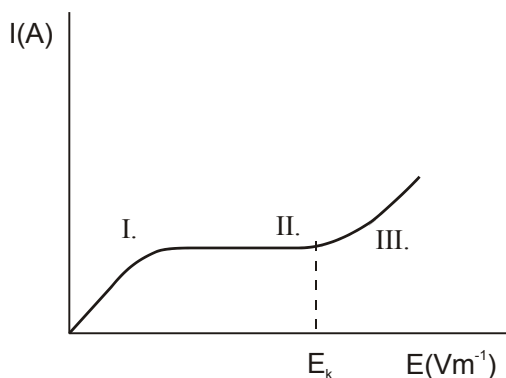
Pre vzduch za normálnych podmienok sa nasýtený prúd pozoruje v oblasti intenzity elektrického poľa približne od 0,7 do  $10^6$   $Vm^{-1}$ . V tejto oblasti intenzity elektrického poľa sa vodivosť vzduchu so zväčšovaním intenzity elektrického poľa hyperbolicky znižuje. Pre ilustráciu uvedieme, že hodnota vodivosti vzduchu v oblasti nasýteného prúdu pri intenzite elektrického poľa  $E = 10^5$   $Vm^{-1}$  a vzdialenosti medzi elektródami  $d = 10^{-2}$  m je  $6,4 \cdot 10^{-20}$   $Sm^{-1}$ .

V oblasti intenzity elektrického poľa vyššej ako  $10^6$   $Vm^{-1}$  sa začína nárazová ionizácia molekúl vzduchu, v dôsledku čoho sa prúdová hustota so vzrastom intenzity elektrického poľa exponenciálne zvyšuje. Voltampérová charakteristika plynných izolantov je znázornená na obr. 5.22. V oblasti platnosti Ohmového zákona (I.) a nasýteného prúdu (II.) hovoríme o nesamostatnej vodivosti (voľné nosiče sú tvorené cudzími ionizačnými činiteľmi). V oblasti nárazovej ionizácie (III.), ide o oblasť samostatnej vodivosti zapríčinennej elektrickým poľom, zapríčinenú samostatným elektrickým poľom. Na obr. 5.23 je závislosť vodivosti plynných izolantov od napätia.

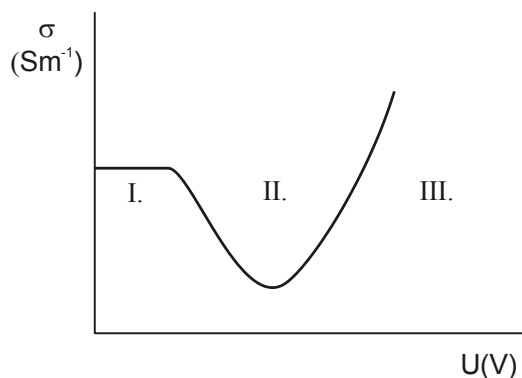
S rastom molekulovej hmotnosti sa pohyblivosť znižuje (tab. 5.3)

Tabuľka 5.3 Porovnanie pohyblivosti kladných a záporných iónov

Prvok	$u_+$ ( $m^2V^{-1}s^{-1}$ )	$u_-$ ( $m^2V^{-1}s^{-1}$ )
Vodík	6	8
Argón	1,37	1,7
Kyslík	1,3	1,8



Obr. 5.22 VA charakteristika plyných izolantov



Obr. 5.23 Závislosť vodivosti plyných izolantov od napätia

## 5.7.2 Elektrická vodivosť kvapalných izolantov

### 1. Kvapaliny s kovalentnými väzbami

- **Nepolárne kvapalné izolanty** majú iónový charakter elektrickej vodivosti (disociácia molekúl nečistôt a prímiesí), pričom ióny vznikajú disociáciou molekúl nečistôt a prímiesí, ktoré sa v kvapaline nachádzajú. Veľmi citlivou nečistotou na elektrickú vodivosť týchto kvapalín sú molekuly vody, ktoré samotné ľahko disociujú a zároveň podporujú aj disociáciu iných nečistôt a prímiesí.

**Coehnovu pravidlo:** koloidné častice sa budú nabíjať kladne, ak ich permitivita je väčšia ako permitivita kvapalného izolantu.

V koloidných sústavách sú nositeľmi nábojov koloidné častice. Ide predovšetkým o emulzie (koloidné častice kvapaliny v kvapaline) a suspenzie (koloidné častice tuhej látky v kvapaline). V elektrickom poli sa koloidné častice pohybujú, pretože sú elektricky nabité, čo sa navonok prejavuje ako elektroforéza. Elektroforéza sa líši od elektrolyzy (iónovej vodivosti) tým, že pri nej nenastávajú na elektródach chemické zmeny a vylučovanie látok, ale mení sa len pomerná koncentrácia koloidných častíc v rôznych vrstvách.

- **Polárne kvapalné izolanty** majú iónový charakter elektrickej vodivosti, pričom ióny vznikajú nielen disociáciou nečistôt, ale aj disociáciou vlastných molekúl, pričom v koloidných sústavách prístupuje k iónovej vodivosti aj *elektroforetická*. Možno preto očakávať, že elektrická vodivosť polárnych kvapalných izolantov bude väčšia, ako nepolárnych kvapalných izolantov. V polárnych kvapalných izolantoch býva koncentrácia nečistôt spravidla väčšia, ako v nepolárnych kvapalných izolantoch z toho dôvodu, že sa v nich nečistoty a charakter, pričom v koloidných sústavách prístupuje k iónovej vodivosti aj elektroforetická vodivosť. V tomto type izolantov však ióny vznikajú nielen disociáciou molekúl nečistôt a prímiesí, ale aj čiastočnou disociáciou molekúl samotnej kvapaliny. Možno preto očakávať, že elektrická vodivosť polárnych kvapalných izolantov bude väčšia, ako nepolárnych kvapalných izolantov. V polárnych kvapalných izolantoch býva koncentrácia nečistôt spravidla väčšia, ako v nepolárnych kvapalných izolantoch z toho dôvodu, že sa v nich nečistoty ľahšie rozpúšťajú a ťažšie sa z nich odstraňujú.

- **Silne polárne (dipólové) kvapaliny** - takéto kvapaliny sa v praxi nepoužívajú ako izolanty, hoci aj tieto kvapaliny vo veľmi čistom stave majú elektroizolačné vlastnosti (napr. dokonale čistá voda, čistý nitrobenzén, ako aj iné kyseliny a alkoholy).

### 2. Kvapaliny s iónovými väzbami (vodiče II. triedy - elektrolyty)

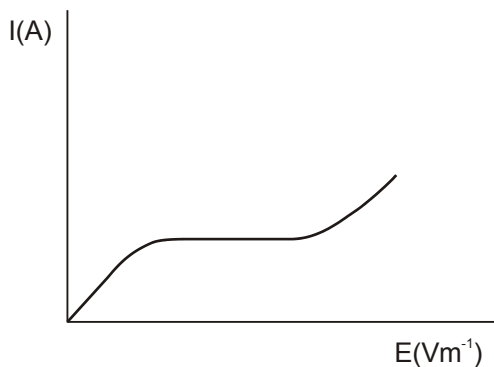
Sem patria taveniny tuhých iónových látok a roztoky týchto látok v disociujúcom rozpúšťadle. Kvapalné látky tohto typu nazývame roztoky elektrolytov, resp. taveniny elektrolytov. Nemajú elektroizolačné vlastnosti a sú vodičmi II. triedy.

### 3. Kvapaliny s kovovými väzbami

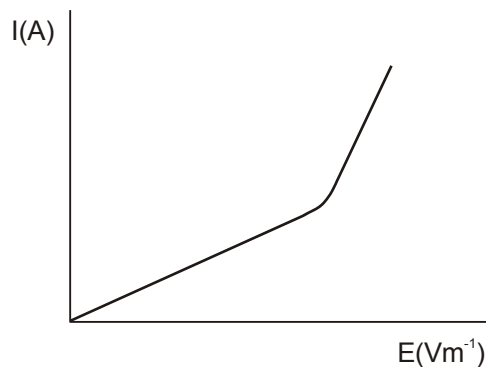
Ide o roztavené kovy alebo o roztavené zliatiny kovov. Tieto látky sú vodičmi I. triedy.

Z uvedeného prehľadu látok v kvapalnom skupenstve vyplýva, že ako elektroizolačné kvapaliny sa v praxi používajú iba kvapaliny s kovalentnými väzbami v molekulách, ktoré nevykazujú príliš vysoký dipólový moment ( $\epsilon_r$  rádovo do 10). Aj keď koncentrácia iónov, resp. koloidných skupín nie je v kvapalných izolantoch príliš vysoká, môžu mať kvapalné izolanty značnú elektrickú vodivosť, zapríčinenú relatívne vysokou pohyblivosťou voľných nosičov náboja. S ohľadom na uvedený charakter elektrickej vodivosti kvapalných izolantov sa v nich pre dosiahnutie vysokej rezistivity využíva proces elektrolytického čistenia.

V extrémne čistých kvapalných izolantoch sa na voltampérovej charakteristike pozoruje oblasť nasýteného prúdu (obr. 5.24), ktorá sa v technicky čistých kvapalných izolantoch nepozoruje (obr. 5.25).



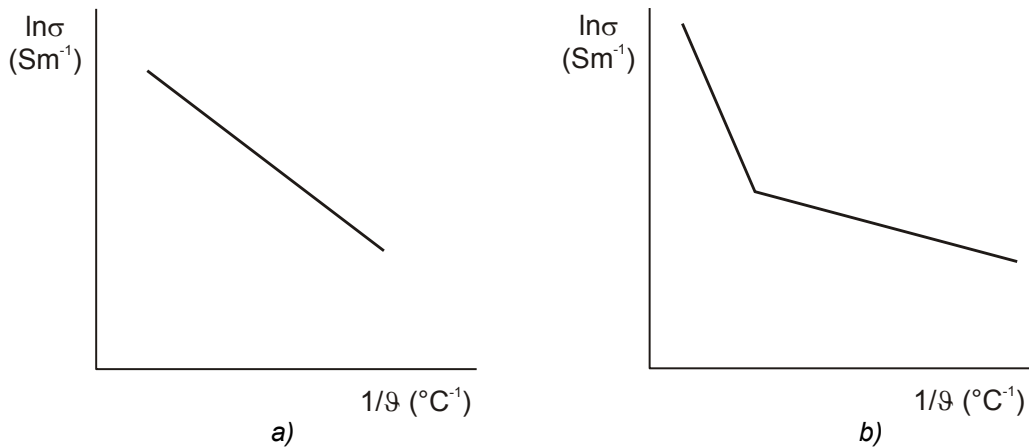
Obr. 5.24 Voltampérová charakteristika extrémne čistých kvapalných izolantov



Obr. 5.25 Voltampérová charakteristika technicky čistých kvapalných izolantov

Pri vyjadrení vodivosti kvapalných izolantov treba vychádzať z ich štruktúry, ktorá vykazuje určitú usporiadanosť molekúl na malé vzdialenosti, tzv. "blízky poriadok". Blízky poriadok molekúl sa však v kvapalných izolantoch neustále mení v dôsledku tepelného pohybu molekúl. Vo všeobecnosti má tepelný pohyb molekúl v kvapalinách kmitavý a translačný charakter. Translačný pohyb sa môže uskutočniť iba vtedy, ak v susedstve molekuly existuje voľné miesto, do ktorého molekula môže preskočiť. Na tento preskok potrebuje molekula získať príslušnú energiu, tzv. aktivačnú energiu.

Elektrická vodivosť kvapalných izolantov rastie s teplotou exponenciálne (obr. 5.26). Teplotná závislosť vodivosti kvapalných izolantov je prevažne zapríčinená teplotnou závislosťou pohyblivosti voľných nosičov náboja, pričom teplotnú závislosť koncentrácie voľných nosičov náboja možno často zanedbať (najmä v užšom teplotnom intervale). Pohyblivosť voľných nosičov náboja závisí od dynamickej viskozity kvapaliny  $\eta$  [N.s.m<sup>-1</sup>], ktorá sa so zvyšujúcou teplotou exponenciálne znižuje. Ukazuje sa, že za určitých okolností je súčin  $\sigma \cdot \eta$  nezávislý od teploty (Waldenov zákon) i napriek tomu, že sa obidve veličiny vystupujúce v súčine exponenciálne menia s teplotou. Vzťah platí, ak sa v kvapaline so zmenou teploty nemení koncentrácia voľných elektrických nábojov a ak sa nemení stupeň disociácie molekúl s teplotou. Zákon platí pre iónovú vodivosť izolantu i pre elektroforetickú vodivosť izolantov, ale iba v úzkom teplotnom intervale. Pre veľmi polárne kvapaliny neplatí.



Obr. 5. 26 Teplotná závislosť elektrickej vodivosti a) kvapalných a b) tuhých izolantov, u ktorých sú dva rôzne mechanizmy vodivosti

S teplotou súvisí pohyblivosť voľných nosičov nábojov. Pohyblivosť častíc kvapaliny súvisí s viskozitou kvapaliny a tiež s elektrickou vodivosťou. Pohyblivosť závisí od dynamickej viskozity  $\eta$ . Súčin elektrickej vodivosti a viskozity je približne konštantný, pokiaľ sa v danej elektroizolačnej kvapaline nemení stupeň disociácie molekúl kvapaliny alebo molekúl nečistôt s teplotou.

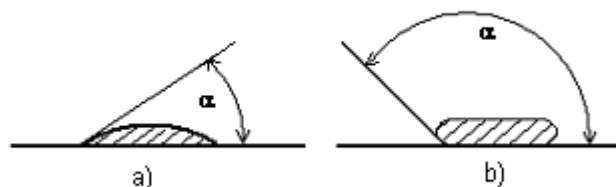
### 5.7.3 Elektrická vodivosť tuhých izolantov

Elektrickú vodivosť tuhých izolantov spôsobuje buď pohyb iónov vlastného izolantu alebo tiež ióny náhodných prímiesí alebo prítomnosť voľných elektrónov.

Podľa mechanizmu vzniku iónov delíme tuhé izolanty na:

- a) iónové kryštalické a sklovité izolanty (iónové väzby),
- b) makromolekulové prírodné a syntetické izolanty (kovalentné väzby).

Elektrická vodivosť tuhých izolantov môže byť **vnútorná** a **povrchová** (podľa uhla zmáčavosti). Povrchovú elektrickú vodivosť zapríčiňuje voda adsorbovaná na povrchu. Voda sa najčastejšie adsorbuje na povrchu v dôsledku kondenzácie vodnej pary z vlhkého vzduchu. Elektrický prúd nepreteká izolantom, ale tenkou vrstvičkou vody adsorbovanej na povrchu. Vlastnosti povrchu izolantu z hľadiska adsorpcie vody úzko súvisia so zmáčavosťou povrchu. Adsorbovaná voda pri iónových a polárnych izolantoch zostane na povrchu v tvare kvapôčky. Zmáčavosť povrchu izolantov sa vyhodnocuje dotykovým uhlom zmáčavosti  $\alpha$ . Pre zmáčavé povrchy je tento uhol menší ako  $90^\circ$  a pre nezmáčavé väčší ako  $90^\circ$  (obr. 5.27). Adsorpcia vodných pár je veľmi rozdielna u rôznych materiálov. Čím je väčší stupeň polarizácie izolantu, tým výraznejšia je adsorpcia vody na jej povrchu.



Obr. 5.27 Uhol zmáčavosti  $\alpha$  a) zmáčavých a b) nezmáčavých povrchov

Hranicou bezpečnej vlhkosti pre elektroizolačné systémy, nad ktorou dochádza k prudkým zmenám vlastností izolantu je 60 % vlhkosť.

## 5.8 Elektrická pevnosť

**Elektrická pevnosť**  $E_p$  je schopnosť izolantu zachovávať si izolačné vlastnosti v elektrickom poli. Je materiálou charakteristikou, ktorú vyjadrujeme ako podiel prierazného napätia  $U_p$  pri skúške elektrickej pevnosti a najkratšej vzdialenosti medzi elektródami  $d$ . Elektrická pevnosť je intenzita elektrického poľa  $E_p$  v dielektriku v okamihu prierazu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (5.39)$$

kde:  $E_p$  ( $\text{Vm}^{-1}$ ) je elektrická pevnosť izolantu,  
 $U_p$  (V) prierazné napätie izolantu,  
 $d$  (m) vzdialenosť medzi elektródami, resp. hrúbka izolantu.

Elektrická pevnosť izolantov závisí od teploty, od homogenity elektrického poľa, od hrúbky izolantu  $d$ , času pôsobenia a od tvaru napäťovej krivky.

*Existujú dve štádiá prierazu:*

**1. štádium prierazu** predstavuje náhly vzrast elektrickej vodivosti izolantu, náhly vzrast koncentrácie voľných nosičov nábojov. Mechanizmus vzniku voľných nosičov nábojov je zapríčinený elektrickým poľom.

Ide o prieraz:

- **čiste elektrický** zapríčinený procesmi elektrónovej povahy (nárázová ionizácia, tunelovanie elektrónov),
- **elektrotepelný** zapríčinený procesmi tepelnej povahy.

**2. štádium prierazu** spojené s degradačnými účinkami (dočasné degradačné účinky u plynov a kvapalín, trvalé degradačné účinky u tuhých izolantov) izolantov.

**Prieraz** je súhrn javov, sprevádzajúcich úplný výboj izolantu tuhého skupenstva s následným poklesom napätia a nevratne zhoršenými elektrickými vlastnosťami. Ak má pôvod vo vonkajšom elektrickom poli (blesk), je čisto elektrickým prierazom. Ak vznikne trvalá tepelnoelektrická nerovnováha medzi vzniknutým a odvedeným teplom, nastáva čisto tepelný prieraz.

**Preskok** je súhrn javov sprevádzajúcich úplný výboj v plynnom alebo kvapalnom izolante, spojený s poklesom napätia na elektródach, s dočasným zhoršením izolačných vlastností.

**Koróna** je súhrn javov sprevádzajúcich čiastkové výboje v miestach najsilnejšieho elektrického poľa.

**Iskra** je krátkodobý výboj, zvyčajne v plynach, bez trvalo zvýšenej teploty vo svojej výbojovej dráhe.

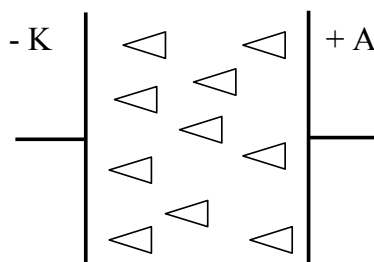
**Sršanie** predstavuje čiastkové výboje v tvare trsov, sprevádzané slabým praskotom.

### 5.8.1 Elektrická pevnosť plynných izolantov

Fyzikálna podstata prierazu plynných izolantov spočíva:

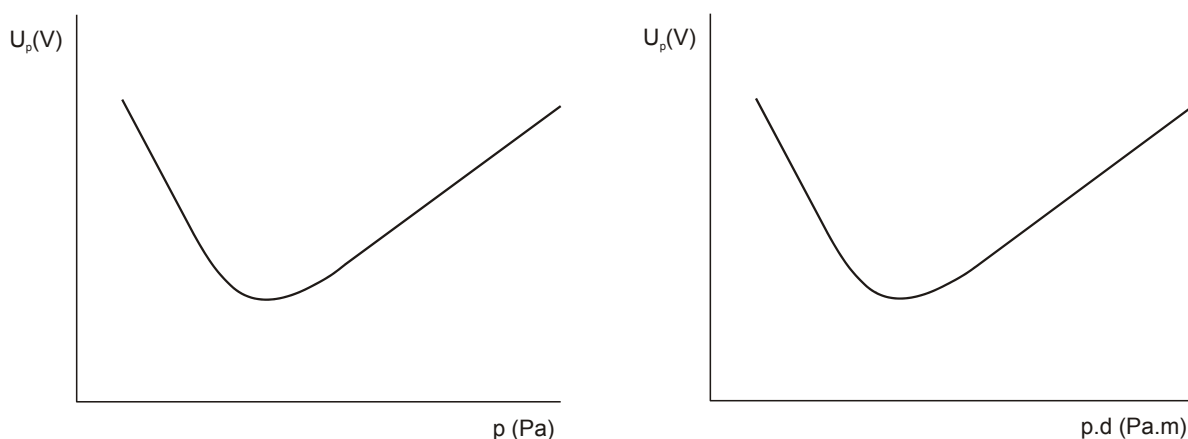
- **v nárázovej ionizácii**, kde rozhodujúcu úlohu majú elektróny,
- **vo fotoionizácii**.

Pri nárazovej ionizácii sa elektróny v elektrickom poli pohybujú od katódy k anóde, dochádza k tvorbe elektrónových lavín, ktoré zapríčiňujú vysokú vodivosť, nastáva prieraz. Veľkosť prierazného napätia závisí od tlaku. Priaznivé podmienky pre prieraz nie sú ani pri vysokom tlaku (malá stredná dráha) ani vo vysokom vákuu.



Obr.5.28 Tvorba elektrónových lavín v plynných izolantoch

**Paschenov zákon:** Pieraz plynu je podmienený lavínovými procesmi, prierazné napätie závisí pri danej teplote iba od súčinu tlaku plynu a vzdialenosti medzi elektródami, pričom, ak je tento súčin konštantný, prierazné napätie je konštantné. Na obr. 5.28 je tvorba lavín v plynných izolantoch a na obr. 5.29 závislosť prierazného napätia plynu od tlaku, súčinu tlaku plynu a vzdialenosti elektród.



Obr.5.29 Závislosť prierazného napätia plynu od tlaku, súčinu tlaku plynu a vzdialenosti elektród

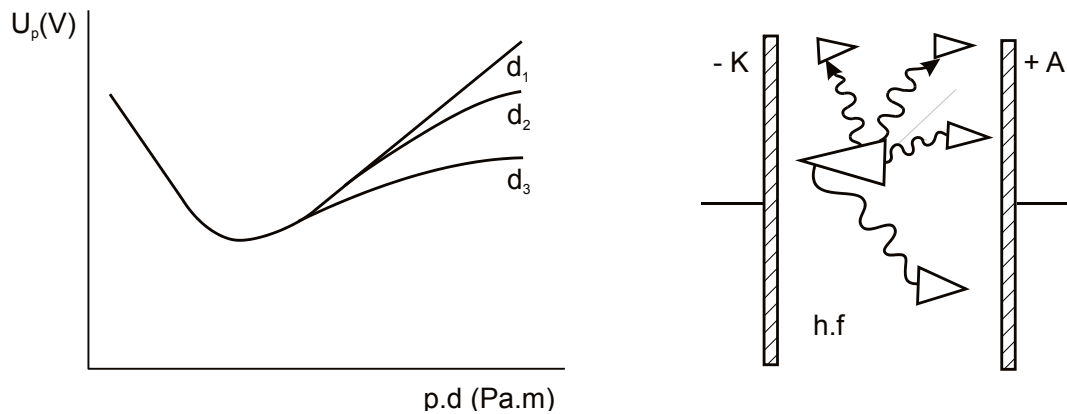
Na katóde majú úlohu „**gama**“ procesy, t.j. uvoľňovanie elektrónov z katódy v dôsledku dopadajúcich kladných iónov na katódu.

V oblasti vyšších tlakov plynu a vzdialeností elektród, má významnú úlohu aj fotoionizácia, (silné elektrické pole), pri ktorej dochádza k vzniku prvotnej lavíny elektrónov, v čele tejto lavíny sekundárne lavíny až sa vytvorí **strimer** (vodivý kanál vyplnený plazmou). Pri tomto mechanizme je podstatné skrátenie času prierazu.

V nehomogénnom elektrickom poli prebiehajú čiastočné výboje (**koróna**), ktoré prechádzajú do iskrového alebo oblúkového výboja.

**Výboj** je súhrn javov, sprevádzajúcim prechod prúdu izolačným prostredím. Na obr. 5.30 je závislosť prierazného napätia plynu od súčinu p.d a kanálový výboj v plynných izolantoch.





Obr. 5.30 Závislosť prierného napätia plynu od súčinu  $p \cdot d$  a kanálový výboj v plynných izolantoch

### 5.8.2 Elektrická pevnosť kvapalných izolantov

Elektrická pevnosť kvapalných izolantov je o jeden rád vyššia ako elektrická pevnosť plynných izolantov. Prieraz v kvapalných izolantoch môže byť čisto elektrický a elektrotepelný. Nečistoty sú buď rozpustené v kvapalných izolantoch (malý vplyv) alebo s kvapalinou tvoria koloidnú sústavu (veľký vplyv). Extrémne čisté kvapaliny majú 5 až 10 vyššiu elektrickú pevnosť ako technicky čisté kvapaliny.

Pri nízkych teplotách dochádza k vymŕzaniu koloidnej  $H_2O$ , pri vysokých teplotách k tvorbe bublín (vodivý plynový kanál).

### 5.8.3 Elektrická pevnosť tuhých izolantov

Prieraz v tuhých izolantoch môže byť:

- **čiste elektrický:** ak sa neporuší tepelnoelektrická rovnováha, spôsobujú ju procesy e povahy. Nastáva náhle a rýchlo, je spojený s poklesom napätia na elektródach, obrovským vzrastom elektrického prúdu a tiež trvalým zhoršením izolačných vlastností.
- **elektrotepelný:** ak sa poruší tepelnoelektrická rovnováha. Následkom dielektrických strát vzniká väčšie množstvo tepla v izolante ako sa z izolantu odvedie do okolia. Nastáva pomaly. Prierazné napätie izolantu pri elektrotepelnom prieraze je tým väčšie, čím väčší je koeficient.
- **elektrochemický:** zmeny v chemickom zložení izolantu v dôsledku pôsobenia elektrického poľa.
- **ionizačný:** v izolantoch, ktoré obsahujú plynové alebo vzduchové dutinky.

Prierazové napätie izolantu pri elektrotepelnom prieraze je tým väčšie, čím väčší je koeficient prestupu tepla z izolantu do okolia, čím menšia je jeho elektrická vodivosť a čím má izolant menší teplotný koeficient elektrickej vodivosti.