

7

Elektroizolační materiály a jejich aplikace v el. zařízeních



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- VYSVĚTLÍME SI, JAKÝ JE ROZDÍL MEZI ČASTO ZAMĚŇOVANÝMI POJMY „DIELEKTRIKUM“ A „IZOLANT“.
- DOZVÍTE SE, JAK INTERAGUJÍ ELEKTROIZOLAČNÍ MATERIÁLY V JEDNOTLIVÝCH SKUPENSTVÍCH S VNĚJŠÍM ELEKTRICKÝM POLEM.
- UKÁŽEME SI, JAK MOC PESTRÁ JE PALETA MATERIÁLŮ, KTERÉ LZE POUŽÍT PRO ELEKTROIZOLAČNÍ ÚČELY.
- DOZVÍTE SE, ŽE I PŘESTOŽE UŠEL ČLOVĚK PŘI VÝROBĚ SYNTETICKÝCH MATERIÁLŮ DLOUHOU CESTU, TAK BEZ NĚKTERÝCH PŘÍRODNÍCH MATERIÁLŮ BY SE ELEKTROTECHNIKA STÁLE JEŠTĚ NEOBEŠLA.
- DOZVÍTE SE JAKÝ IZOLANT JE NEJBĚŽNĚJŠÍ.
- UKÁŽEME SI, ŽE I VYSOKONAPĚŤOVÁ ROZVODNA NA 35 kV MŮŽE VYPADAT JAKO BĚŽNÝ SKŘÍŇOVÝ ROZVADĚČ.
- VYSVĚTLÍME SI, ŽE SE „MINERÁLNÍ OLEJE“ OPRAVDU NEZÍSKÁVAJÍ „LISOVÁNÍM MINERÁLŮ“ :-).



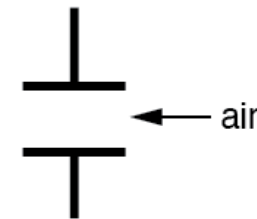
7.1 Dielektrika a izolanty

Dielektrika a **izolanty** patří k neodmyslitelné součásti každého elektrického zařízení. I přesto, že jsou tyto **pojmy často zaměňovány, je mezi nimi velký rozdíl.**

Co je dielektrikum?

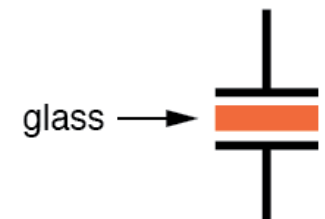
- Hlavní vlastností dielektrika je **schopnost polarizovat se v elektrickém poli.**
- Hlavním parametrem dielektrika je jeho **relativní permitivita (ϵ_r).**
- Dielektrika se využívají k **hromadění elektrické energie (kondenzátory).**
- Dielektrikum představuje **širší pojem než izolant. Ne každé dielektrikum je izolantem**, dielektrikum může být např. *polovodičem*.

less capacitance



(relative permittivity = 1.0006)

more capacitance



(relative permittivity = 7.0)

Příklady dielektrik: *slída, kondenzátorový papír, plasty*, ale také **voda, kyselina chlorovodíková** nebo třeba **amoniak**.

Co je izolant?

- Jako izolanty můžeme označit **dielektrika s vysokou rezistivitou**.
- Hlavní vlastností izolantu je **schopnost klást velký odpor průtoku elektrického proudu** => izolanty jsou určeny k vzájemnému odizolování míst s různým potenciálem a k zabránění průchodu el. proudu mezi nimi.
- Hlavním parametrem izolantu je **rezistivita** = *měrný odpor* (ρ).
- Izolanty jsou podmnožinou dielektrik: **každý izolant je dielektrikem, ale ne každé dielektrikum je izolantem**.
- **Ideálním izolantem** je pouze **vakuum**, popř. technický izolant za teploty v okolí **absolutní nuly**.
- **Každý technický izolant** je za normálních podmínek **do určité míry vodivý**.

Příklady izolantů: *porcelán, sklo, většina plastů, suché dřevo, suchý papír, za běžných podmínek i vzduch nebo jiné plyny.*



7.2 Rozhodující vlastnosti izolantů

Za rozhodující vlastnosti izolačních materiálů považujeme:

- Minimální **elektrická vodivost – konduktivita** ($\gamma < 10^{-12} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$).
- **Relativní permitivita** (ε_r) – řádově jednotky.
- Minimální **dielektrické ztráty** ($\text{tg } \delta \leq 10^{-2}$).
- Maximální **elektrická pevnost** ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$, $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$).
- Odpovídající **mechanická pevnost a teplotní odolnost**.

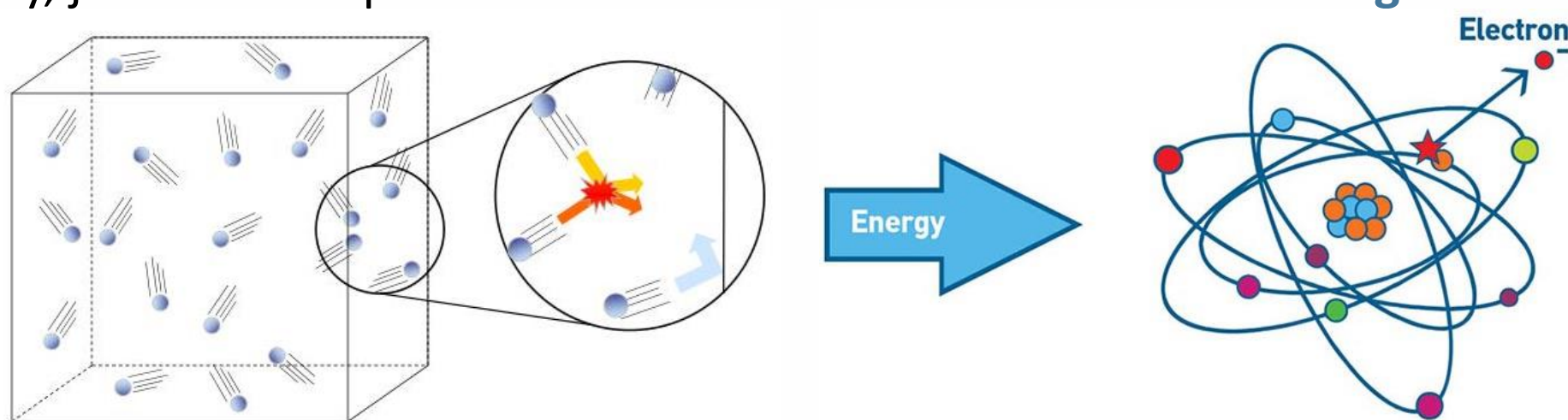


7.2.1 Vodivost izolantů podle skupenství

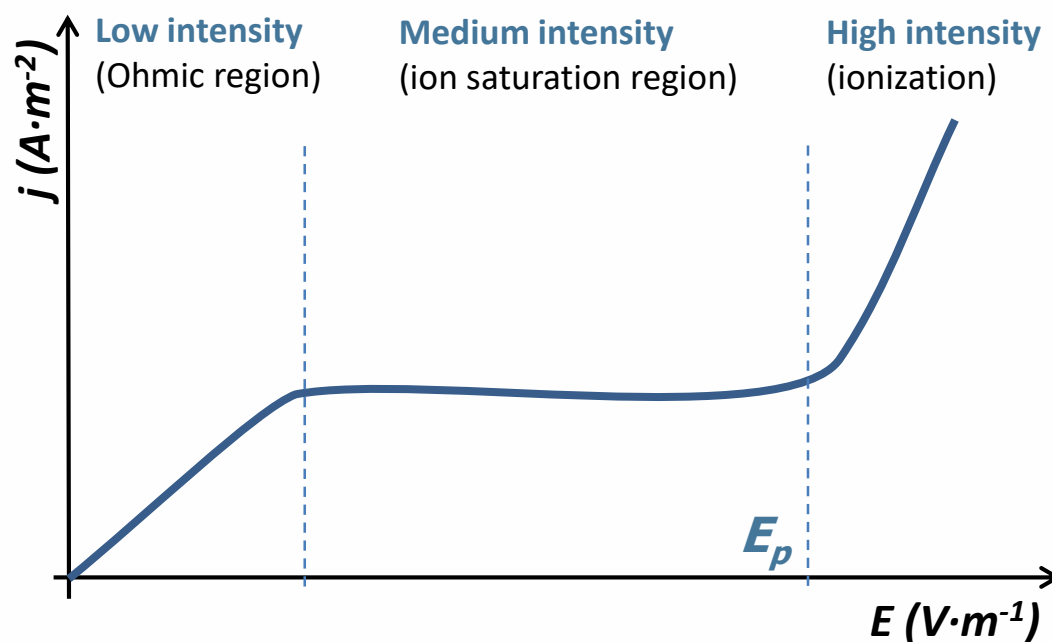
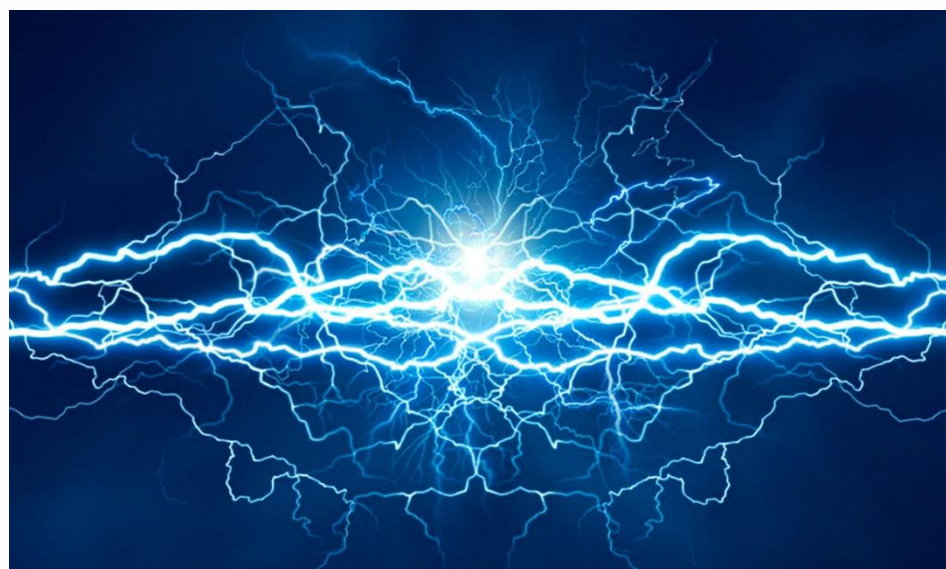
1) Elektrická vodivost plynů

Plyn je **dobrým izolantem** je-li izolován od vnějších ionizačních zdrojů a za **nízkých teplot**. Za těchto podmínek obsahuje plyn pouze **neutrální molekuly**.

Mezi molekulami plynu je obecně **velmi slabá vzájemná interakce**, která probíhá zejména prostřednictvím srážek. Pod vlivem vnějších **ionizačních zdrojů** (dodáním tepelné, světelné nebo jiné formy energie) dochází k **ionizaci** (uvolnění jednoho nebo více elektronů z neutrálního atomu) a následnému **vzniku volných nosičů náboje**. K ionizaci atomu dochází tehdy, jestliže atom pohltí dostatečné množství tzv. **ionizační energie**.

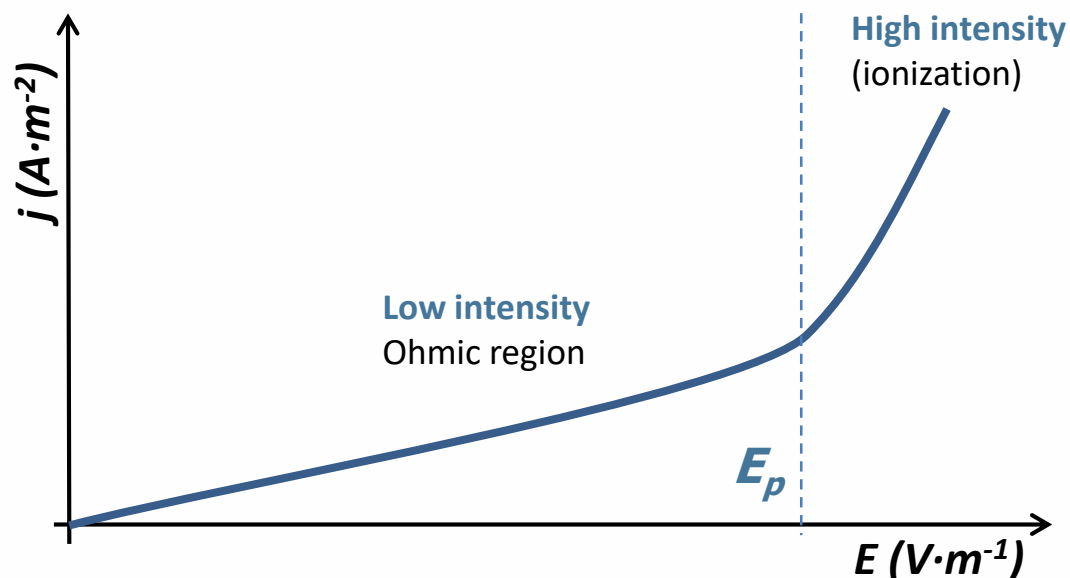
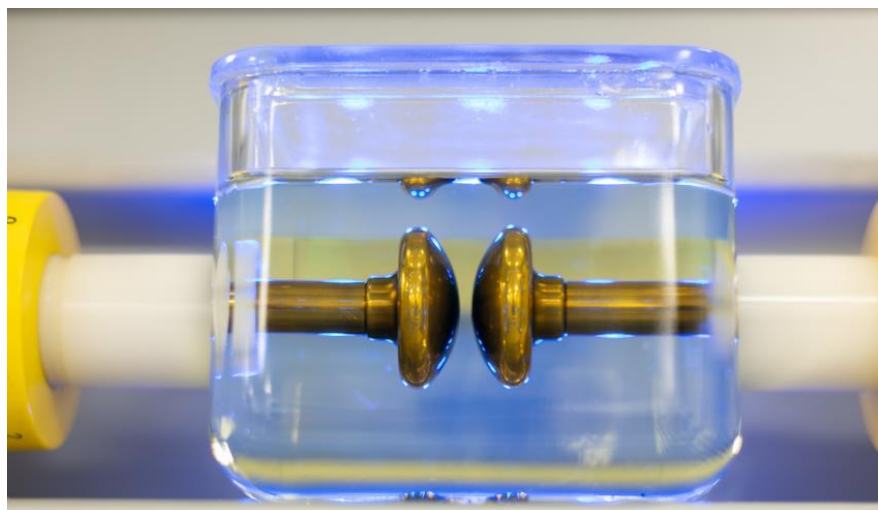


Ve **slabém elektrickém poli** se v plynu projevuje **malá nesamostatná vodivost** a přibližně platí Ohmův zákon. Při **zvyšování intenzity pole** následuje **oblast nasycení**, ve které je **proud konstantní i při zvyšující se intenzitě pole** (počet volných nosičů náboje zůstává stejný). V **silném poli** již dojde k **samostatné vodivosti**. Na elektrony působí velká síla, urychlí je, rychlé elektrony způsobí štěpení neutrálních částic na ionty, v důsledku toho dojde k **prudkému zvýšení proudu** a k **el. přeskoku v ionizovaném plynu**. U plynů se ovšem jedná pouze o **dočasnou ztrátu** elektroizolační schopnosti.



2) Elektrická vodivost kapalin

V kapalinách existuje **mnohem větší vzájemná interakce** než v plynech, ale **slabší než v pevných látkách**. Ve **slabém elektrickém poli** dochází opět pouze k **nesamostatné vodivosti iontů příměsí a nečistot** (přibližně platí Ohmův zákon). V **silném poli** se projeví již **samostatná elektronová vodivost**. Střední volná dráha elektronů je menší než u plynů, **není zde stav nasycení** a po překročení určité hodnoty intenzity elektrického pole (elektrické pevnosti dané kapaliny) nastane velký nárůst proudu a **el. přeskok** v kapalině. Opět se jedná o **dočasnou ztrátu** elektroizol. schopnosti.



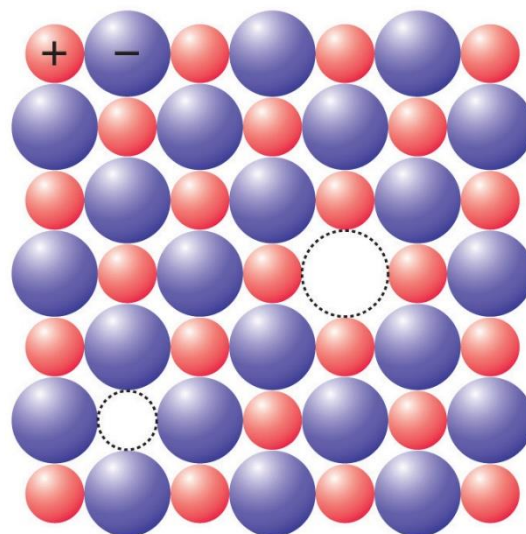
Poznámka: Polární látky mají obecně **větší elektrickou vodivost**, která je navíc značně **náchylná i na velmi malá množství nečistot**.

3) Elektrická vodivost pevných látek

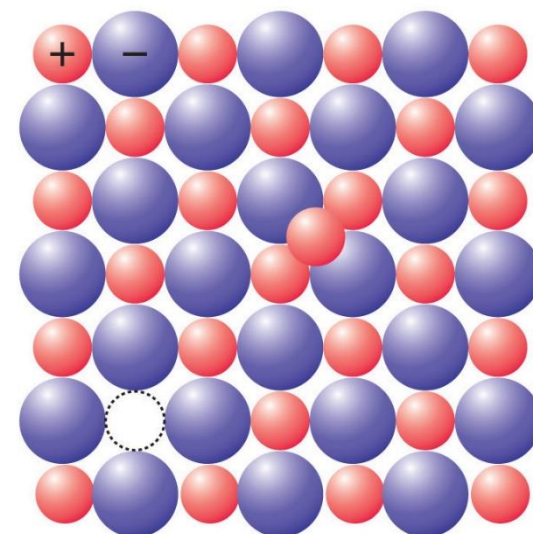
Pevné izolanty **mají největší hustotu látky**. Na rozdíl od plyných a kapalných látek může proud procházet **objemem materiálu a i po jeho povrchu**, proto u pevných izolantů rozlišujeme **vnitřní** a **povrchovou vodivost**. Při překročení elektrické pevnosti dochází k **nevratnému** (destruktivnímu) **elektrickému průrazu** daného izolantu.

Volné nosiče náboje mohou v pevných látkách vznikat **vlivem příměsí** nebo také **v důsledku poruch** krystalové mřížky:

- **Frenkelovy poruchy** – elektrická vodivost vzniká difúzí přes intersticiální, ale i vakantní polohy.
- **Schottkyho poruchy** – jsou způsobeny tím, že atomy opustí uzlové polohy a difundují na povrch krystalu, kde odpovídají za vznik nových rovin krystalové mřížky.



(a) Schottky defect

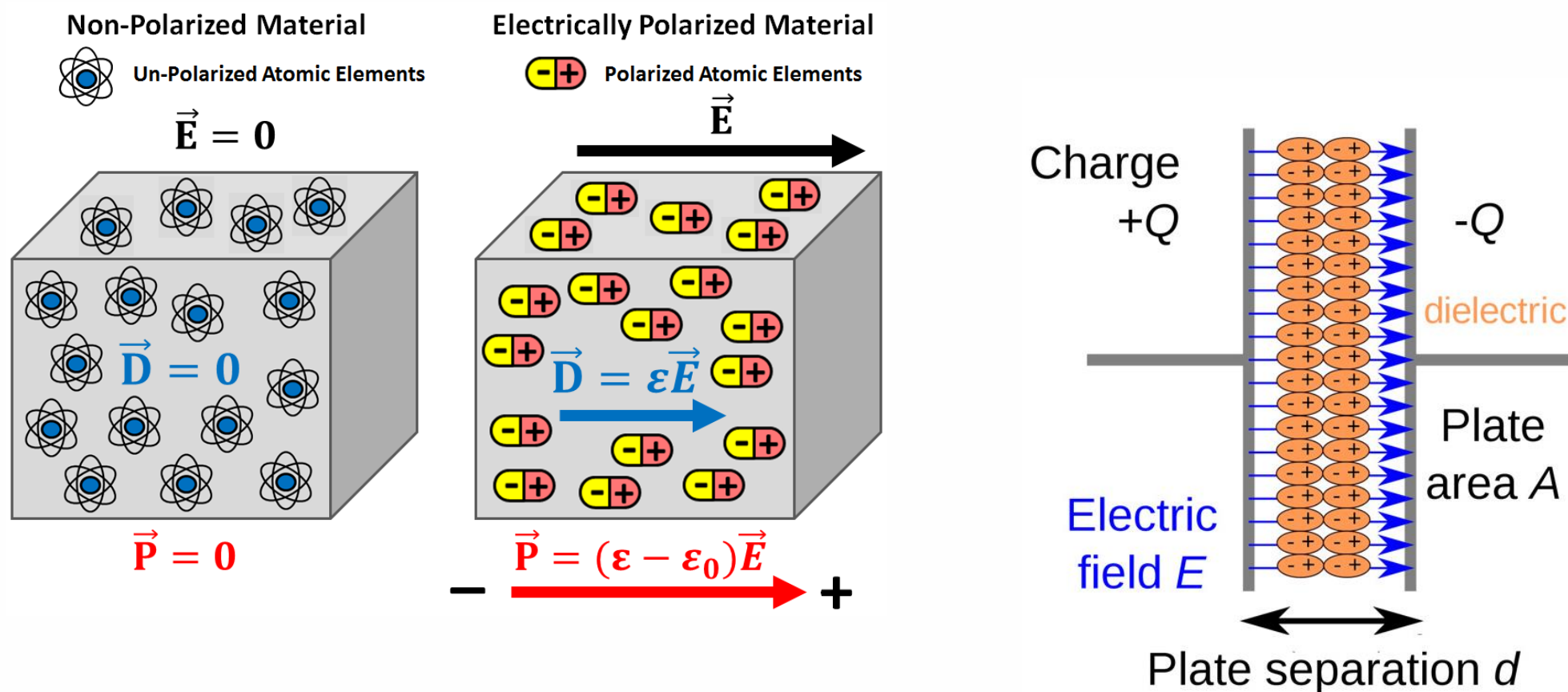


(b) Frenkel defect

7.2.3 Polarizace, permitivita

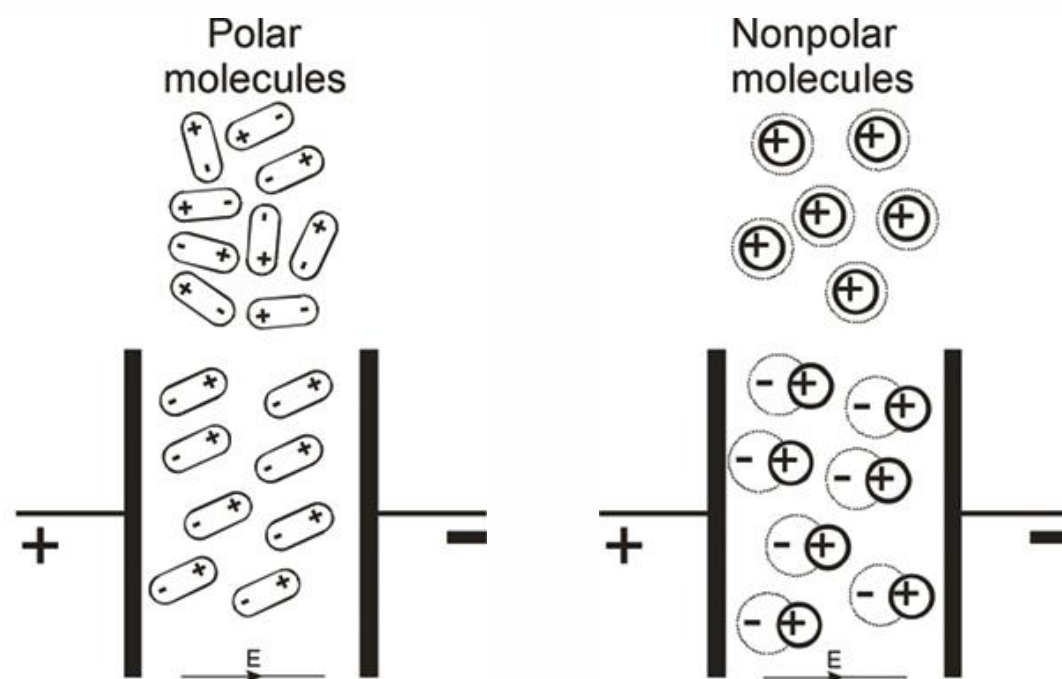
Elektrická polarizace dielektrika je proces, při kterém dochází k **narušení symetrie rozdělení el. nábojů v atomech** daného dielektrika. Polarizace nastává po vložení dielektrika do elektrického pole.

Proti této změně působí silné vazebné síly nebo **tepelný pohyb okolních molekul**.



Polární dielektrika (např. voda) obsahují el. dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole. Jejich směr je ale **neuspořádaný** a při polarizaci dojde pouze k **uspořádání těchto dipólů do jednoho směru**.

Při polarizaci **nepolárních dielektrik** se působením přitažlivé a odpuzivé elektrické síly stanou z atomů nebo molekul **elektrické (indukované) dipóly** a dojde tak k **nesymetrickému rozložení částic s el. nábojem**.



Po vymizení vnějšího pole u **nepolárních látek** indukovaný dipól **zanikne**, v případě **látek polárních** se jednotlivé molekuly v důsledku tepelného pohybu **zpětně chaoticky orientují**. Pohybem částic vzniká, až do okamžiku rovnováhy, **elektrický (tzv. posuvný) proud**. Přitom dochází v dielektriku ke **ztrátám energie** – tzv. **polarizační ztráty**.

Schopnost materiálu polarizovat se ve vnějším el. poli v praxi definuje **relativní permitivita** ε_r , která je **snadno měřitelná**. Nejčastěji se určuje porovnáním kapacity kondenzátoru **s dielektrikem** (C) a **bez dielektrika** (C_0) se stejnými geometrickými rozměry:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} .$$

Můžeme také použít vztah mezi vektory **elektrické indukce** $\vec{D}$ a **intenzity elektrického pole** $\vec{E}$ ve tvaru:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} ,$$

kde ε_0 ($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$) je **permitivita vakua** a $\varepsilon_r(-)$ je **relativní permitivita**.

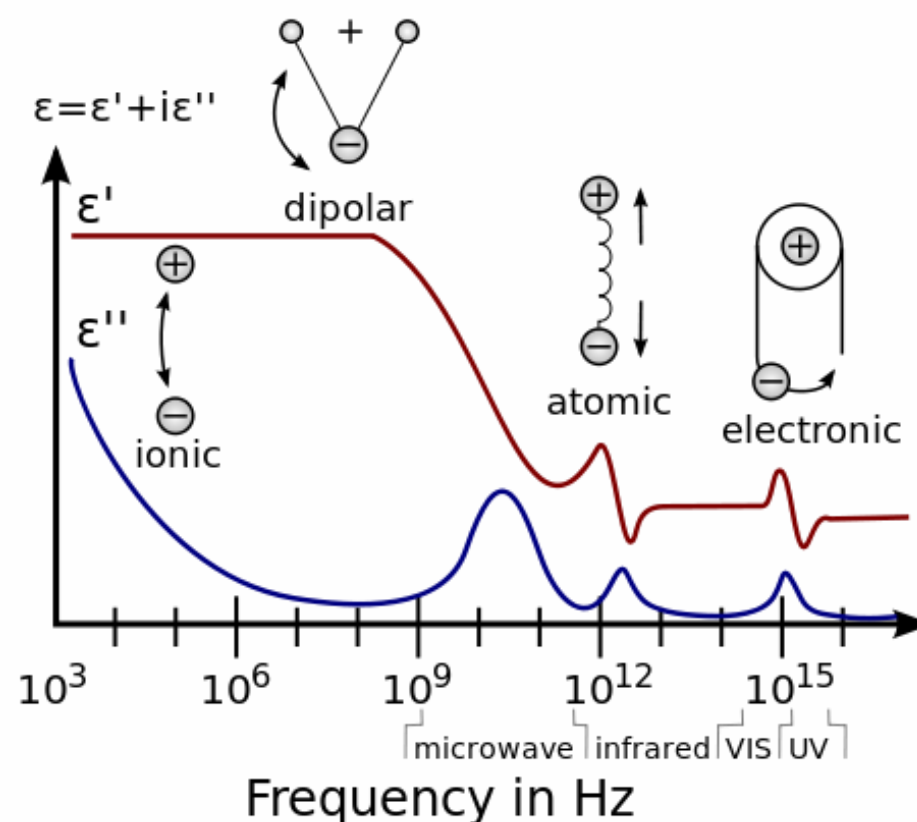
Je-li závislost $\vec{D}$ na $\vec{E}$ lineární, tj. ε_r je **nezávislá na intenzitě el. pole**, jedná se o tzv. **lineární dielektrika**, je-li ε_r **závislá na intenzitě el. pole**, jedná se o **nelineární dielektrika**.



V dielektriku obvykle **dochází k několika druhům polarizace současně**.

Podle tzv. **relaxační doby** (doby ustálení) můžeme jednotlivé polarizace dělit na:

- **Pružné** (beze ztrát) – **elektronová, iontová a pružná deformační**.
- **Nepružné** (ztrátové) – **iontová relaxační, dipólová relaxační a migrační** (někdy označována také jako **mezivrstvová**).



Látka	Převládající polarizace	ϵ_r (-)
nepolární izolanty	pouze pružná elektronová a iontová	< 2,5
polární izolanty	nepružné relaxační polarizace	1 - 10
feroelektrika	iontová relaxační	$10^3 - 10^4$ i více

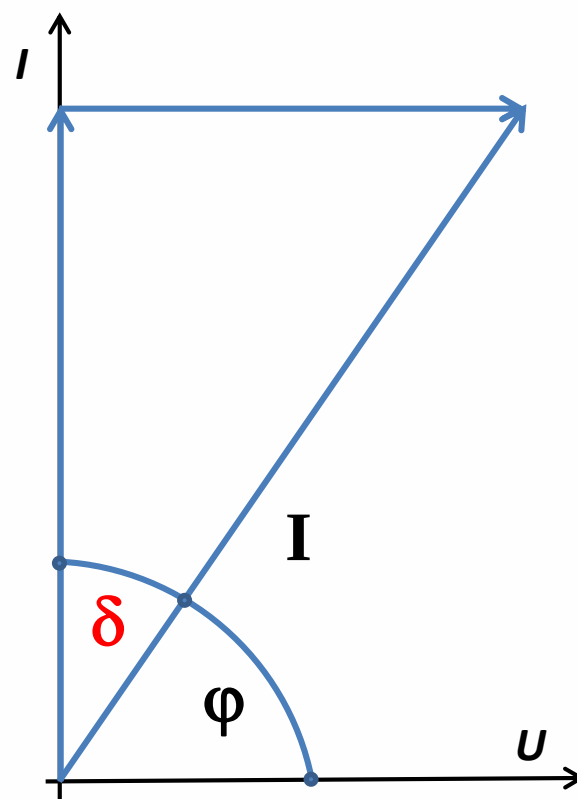
7.2.3 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty představují **energii**, která se při zapojení dielektrika do elektrického obvodu **přemění v dielektriku na teplo**. Příčinou je především (i) **vodivost materiálů**, která je dána u izolantů jejich **nepravidelným složením** nebo **strukturou**, ale také (ii) **polarizační pochody**, které se **ustalují příliš pomalu** v porovnání se změnou pole (při zatěžování izolantu **střídavým elektrickým polem**).

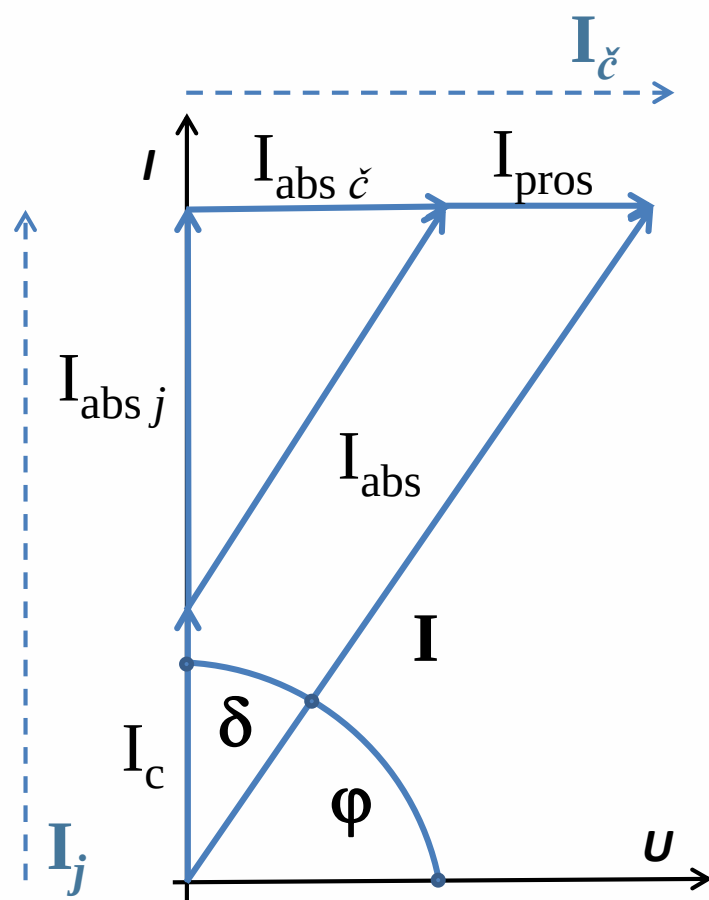
U **bezeztrátového kondenzátoru** předbíhá proud napětí o úhel: $\varphi = 90^\circ$.

U **reálného (ztrátového) dielektrika** se zmenší předstih proudu před napětím o určitý úhel δ (tzv. **ztrátový úhel**), přičemž platí: $\varphi = 90 - \delta$.

Ve **STEJNOSMĚRNÉM POLI** je proud protékající izolantem **tvořen pouze prosakujícím proudem** způsobeným elektrickou vodivostí daného materiálu.



Ve **STŘÍDAVÉM POLI** přispějí (i) **rychlé, bezeztrátové polarizace** (*elektronová, iontová*) a (ii) **nabíjení geometrické kapacity vzorku** kapacitním proudem I_C k proudu tekoucímu dielektrikem (I_j). Ostatní **ztrátové polarizační jevy** (*orientační, relaxační* a další) přispějí **absorpčním proudem** I_{abs} , který není kolmý na napěťový vektor, ale lze ho rozložit do dvou složek. Jeho **reálná složka** $I_{abs\check{c}}$ spolu s **prosakujícím proudem** I_{pros} určuje **odklon vektoru skutečného proudu** I , a tím velikost úhlu δ , který je vyjádřením velikosti **energie rozptýlené v technickém dielektriku**, tedy energie ztracené. Tento úhel je nazýván **ztrátovým úhlem**.



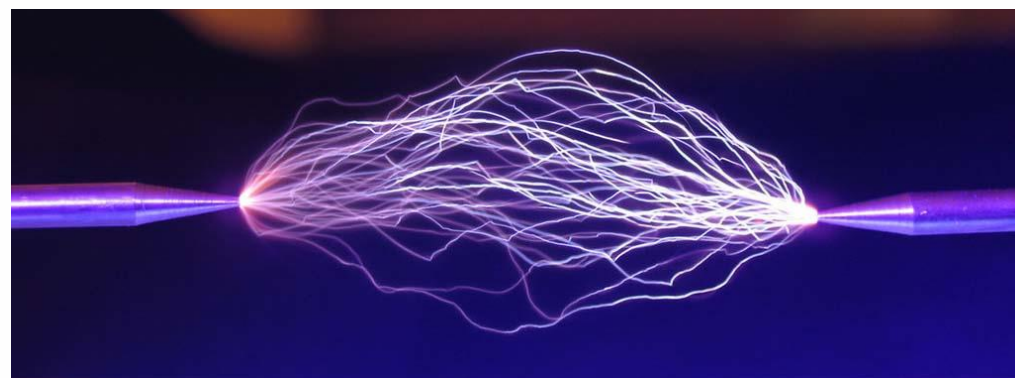
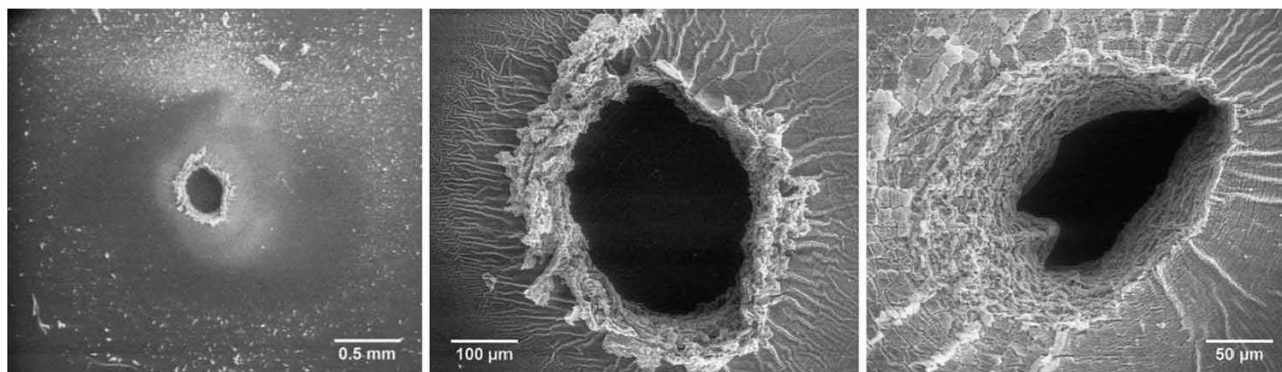
Tangens tohoto úhlu je tzv. **ztrátový činitel** $tg \delta$, pro který lze psát:

$$tg \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'},$$

kde ε' a ε'' je reálná a imaginární složka **komplexní permitivity** ε^* .

7.2.4 Elektrická pevnost

Izolant si v elektrickém poli zachovává izolační vlastnosti **jen do určité hodnoty intenzity elektrického pole**. Při překročení této hraniční hodnoty **začne odpor izolantu klesat na hodnotu odporu vodičů**. Přestože se intenzita pole dále nezvyšuje a proud narůstá do hodnoty omezené prakticky jen impedancí zdroje napětí a impedancí přívodů k elektrodám, mezi kterými se izolant nachází, **dochází k elektrickému průrazu či přeskoku izolantu**.



Pro **elektrickou pevnost** E_p ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$) platí:

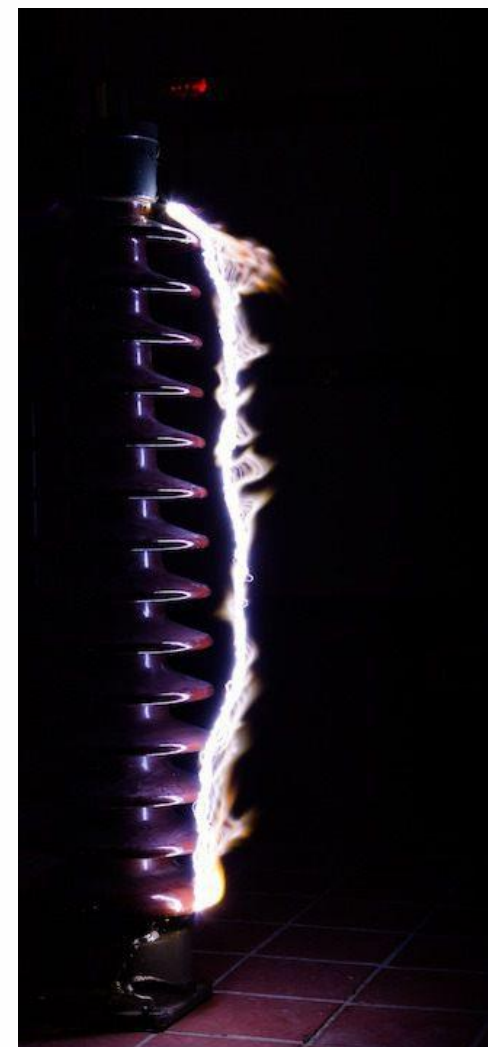
$$E_p = \frac{U_p}{d},$$

kde U_p (V) je **průrazné napětí** a d (m) **tloušťka izolantu**.

Mechanismus průrazu/přeskoku se **liší dle skupenství**. Hodnoty E_p **jsou závislé na velkém množství parametrů** (*druhu a homogenitě přiloženého napětí, teplotě, frekvenci, fyzikálních a chemických vlastnostech daného izolantu, tlaku plynů aj.*).

Fyzikální podstata jevu je nejlépe známa v plynech, méně v pevných látkách a velmi málo v kapalinách.

Platí, že **největší hodnoty elektrické pevnosti jsou u pevných dielektrik**, ihned za nimi **následují kapalná dielektrika** a **nejmenších hodnot dosahují plyny**.



7.2.5 Mechanické vlastnosti izolanů

Mechanických vlastností existuje **celý soubor** a je na konstruktérovi, aby vyhodnotil předpokládané budoucí zatížení izolačního materiálu.

Může se jednat např. o tyto vlastnosti:

- **tuhé izolanty**: *pevnost v tahu, tlaku, ohybu, pevnost v krutu, v ohybu rázem a tvrdost;*
- **vrstvené materiály**: *štípatelnost;*
- **lepené materiály**: *pevnost ve stříhu a lepivost;*
- **pružné látky**: *měkkost, pružnost a tuhost;*
- **fólie**: *vrubová houževnatost a navíjecí schopnost;*
- **zalévací hmoty**: *přilnavost;*
- **povlaky**: *tažnost a odolnost proti otěru.*



7.2.6 Tepelné vlastnosti izolanů

Mezi základní tepelné vlastnosti řadíme:

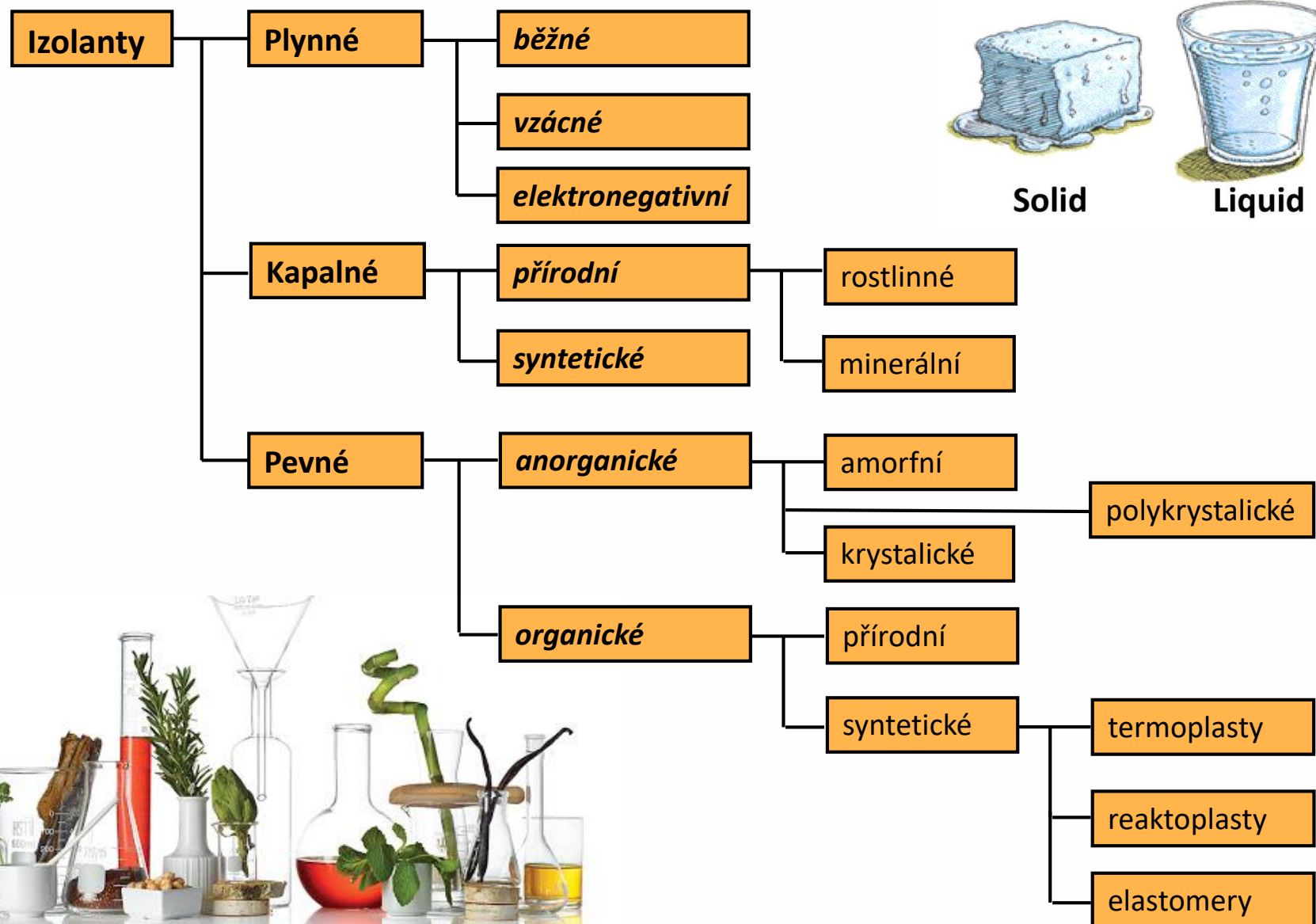
- ***měrné teplo*** – množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 °C;
- ***tepelnou vodivost*** – množství tepla, které projde za jednotku času jednotkovým průřezem látky při jednotkovém rozdílu teplot;
- ***trvalou tepelnou odolnost podle Vicata*** – jedná se o vlastnost izolantu, která určuje maximální možnou provozní teplotu, kterou izolace snese bez poškození;
- ***teplota skelného přechodu***;
- ***součinitel délkové teplotní roztažnosti, vznětlivost, hořlavost, odolnost proti nízkým teplotám*** a mnohé další.

U elektroizolačních materiálů se určuje také tzv. **trvalá tepelná odolnost**, na jejímž základě lze tyto materiál třídit do tzv. **teplotních tříd**: **Y** (90 °C), **A** (105 °C), **E** (120 °C), **B** (130 °C), **F** (155 °C), **H** (180 °C), **200** (200 °C), **220** (220 °C), **250** (250 °C).



7.3 Použití izolantů v el. zařízeních

7.3.1 Základní klasifikace elektroizolačních materiálů



7.3.2 Plynné izolanty (*běžné, vzácné a elektronegativní*)

Plyny jsou **látky s nejmenší elektrickou pevností** ze všech dielektrik. V porovnání s ostatními izolanty **mají také nejnižší relativní permitivitu i dielektrické ztráty**, které jsou navíc prakticky nezávislé na frekvenci el. pole. Pokud nejsou plyny ionizované, **mají i extrémně nízké hodnoty konduktivity**. Plyny **mají schopnost regenerace** a rovnoměrně vyplňují dostupný prostor.

Vzduch

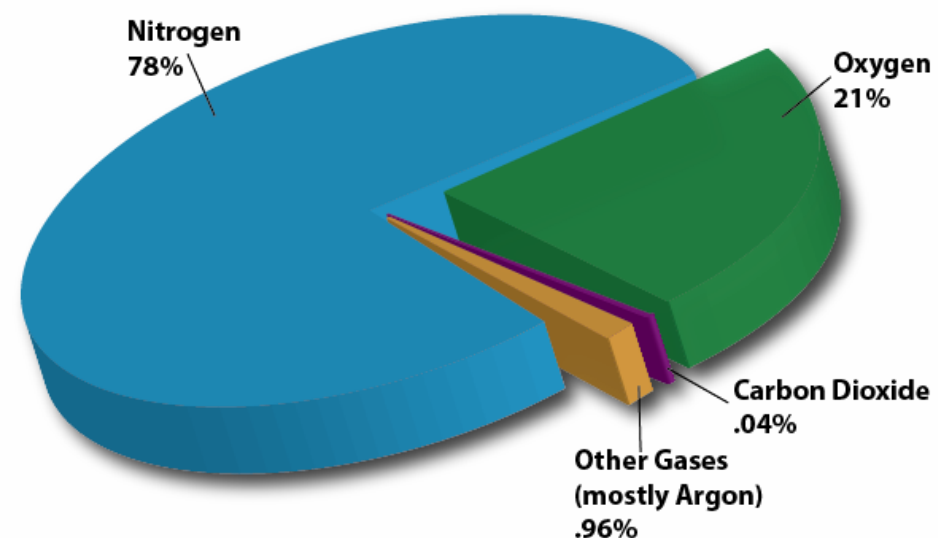
Nejstarší a **nejběžnější izolant**. Využívá se pro *izolaci venkovního vedení, pro chlazení a izolaci u vzduchových transformátorů* a jako *dielektrikum ve vzduch. kondenzátorech*.

Při 20 °C a tlaku 10^5 Pa má relativní permitivitu $\epsilon_r = 1,000594$, konduktivitu $\gamma = 10^{-14} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ a ztrátový činitel ***tg*** $\delta = 10^{-6}$.



7.3 Použití izolantů v el. zařízeních

Plyn	Značení	Objemový podíl ve vzduchu (%)	Bod varu (°C)
Dusík	N ₂	78	-195,8
Kyslík	O ₂	21	-183
Argon	Ar	0,9325	-186
Oxid uhličitý	CO ₂	3.10 ⁻²	-78
Neon	Ne	1,61.10 ⁻³	-246
Helium	He	4,6.10 ⁻⁴	-269
Metan	CH ₄	1.10 ⁻⁴	-161,4
Vodík	H ₂	1.10 ⁻⁴	-253
Krypton	Kr	1,08.10 ⁻⁴	-153
Xenon	Xe	8.10 ⁻⁶	-109



Dusík

Vlastnosti dusíku jsou **velmi podobné vlastnostem vzduchu**. Získává se destilací kapalného vzduchu, **je lehčí než vzduch** a **má menší el. pevnost**. Dusík **nemá oxidační účinky** vyplývající z přítomnosti kyslíku ve vzduchu, a proto se používá **jako *inertní atmosféra*** chránící okysličování izolačních olejů v transformátorech. Dále se používá jako *chladicí médium* v kryogenní technice, jako *chladicí a izolační látka* v suchých výkonových transformátorech apod.

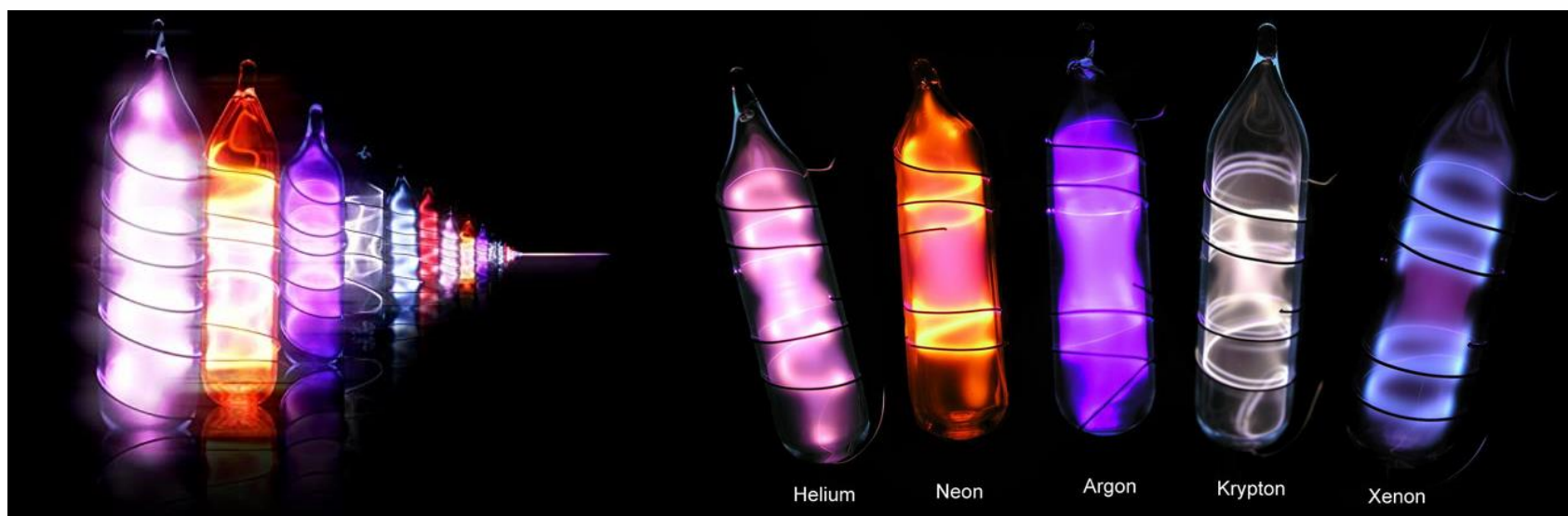


Vodík

Vodík **je nejlehčí prvek**, získává se elektrolýzou vody. Jeho **měrná tepelná vodivost je 7krát vyšší než u vzduchu**, **měrná hmotnost asi 14krát nižší**. Vodík **je schopen odvést o 30 – 50 % více tepla než vzduch** => používá se **pro chlazení velkých točivých strojů**. Dále také k *plnění výbojek*, v elektrických pecích jako *redukční/reakční atmosféra*, jako *zhášecí prostředek* v elektrických vypínačích. Jeho **nevýhodou je hořlavost a výbušnost ve směsi se vzduchem**.

Vzácné plyny (He, Ne, Ar, Kr, Xe)

Pro svoji netečnost označované jako **inertní**. Nacházejí se ve vzduchu a získávají se jeho destilací v kapalném stavu. **Netvoří sloučeniny** ani v ionizovaném stavu a **chemicky nereagují se žádnými prvky**. Používají se jako *náplně výbojek, žárovek, zářivek* nebo jako *ochranná atmosféra* např. *při výrobě polovodičů*.



Elektronegativní plyny – fluorid sírový SF_6

Elektronegativní plyny **obsahují chlor a fluor**, mají **sníženou pohyblivost nosičů el. nábojů**, což se projevuje **zvýšením jejich elektrické pevnosti**. Nejznámějším z nich je **fluorid sírový (SF_6)**.

Fluorid sírový je bezbarvý, bez zápachu. Je asi **5krát těžší než vzduch**, **nehořlavý** a **do 200 °C chemicky stabilní** a **netoxický**. Je **nepolární** (s neměřitelným $\tan \delta$ a s ε_r nezávislou na frekvenci). SF_6 má **vysokou el. pevnost** (porovnatelnou s E_p minerálního oleje a třikrát větší než E_p vzduchu). Jedná se o **nejčastěji používaný elektronegativní plyn**. Používá se **v zapouzdřených rozvodnách**, jako **chladicí a izolační médium** v transformátorech a ve vypínačích vvn pro jeho schopnost přerušování oblouku. Tepelně může být namáhán do 150 °C.



Zapouzdřená rozvodna 400 kV (přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně).

7.3 Použití izolantů v el. zařízeních



Třífázové zapouzdřené vedení 22 kV.



Zapouzdřená rozvodna 110 kV SF₆.



**Zapouzdřená rozvodna 400 kV SF₆
(pro vyvedení výkonu elektrárny).**



Zapouzdřená rozvodna 35 kV SF₆.

7.3.3 Kapalně izolanty (*přírodní oleje a syntetické kapaliny*)

Kapalně izolanty dobře **vyplňují daný prostor** a **dobře odvádějí přebytečné teplo**. **Usnadňují zhášení výboje** a **odlehčují zatížení pevných izolantů**. Obvykle se vyznačují **kovalentní chemickou vazbou**. **Voda a nečistoty snižují jejich elektrickou pevnost** a **zvyšují vodivost**.

Mezi jejich hlavní představitele patří:

- *přírodní oleje: (i) rostlinné a (ii) minerální,*
- *syntetické kapaliny.*



7.3.3.1 Rostlinné oleje

Vyrábějí se **lisováním rostlinných semen**.

Z chemického hlediska jsou **směsí esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin**. V elektrotechnice se rostlinné oleje používají relativně málo.

Dále je dělíme na **nevysychavé** (*ricinový olej*) a **vysychavé** (*lněný a dřevný olej*).

Ricinový olej se používá např. k napouštění papírových kondenzátorů (zejména pro stejnosměrné obvody).

U **vysychavých rostlinných olejů** (**lněný a dřevný olej**) dochází k chemické reakci při pohlcení kyslíku, jedná se o **současnou oxidaci a polymeraci**. Tyto látky **mají charakter tvrditelných hmot** a vytváří tenkou **vrstvu s dobrými elektroizolačními vlastnostmi**. Dnes se používají pouze jako přísady do některých elektroizolačních laků.

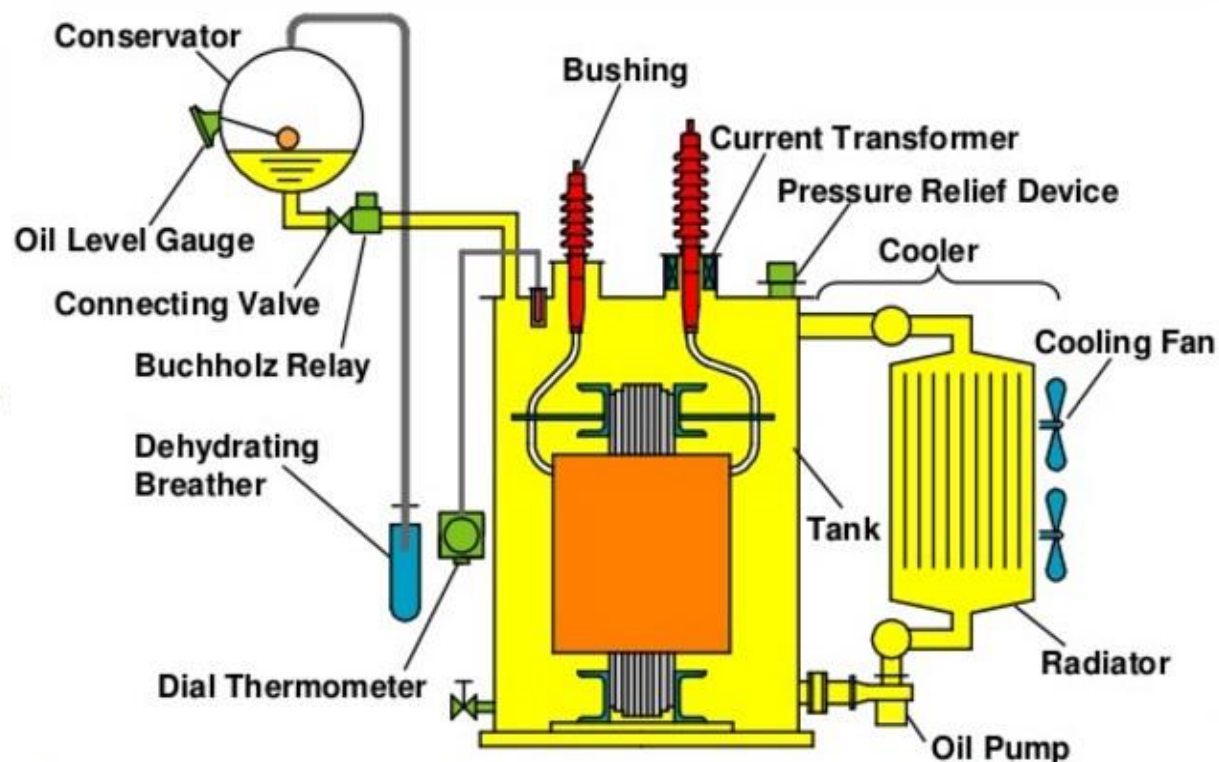
7.3.3.2 Minerální oleje

Získávají se **destilací ropy s následnou rafinací**. Jedná se o **směsi různých uhlovodíků**. Jejich vlastnosti se vlivem provozních činitelů (*teplota, záření, působení kyslíku, voda a plyny*) mění, tj. **minerální oleje stárnou**, což je jejich nevýhoda.

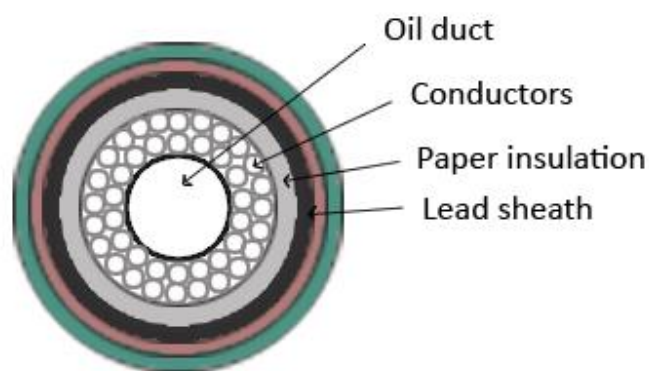
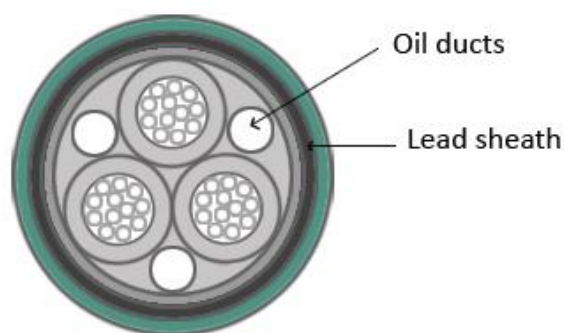


Podle použití dělíme minerální oleje na:

1) Transformátorové – jsou charakteristické **světle žlutou barvou**. Používají se v transformátorech a ve velkých výkonových vypínačích jako izolace a zároveň chlazení. Důležitá je jejich **viskozita a její teplotní závislost**. Při nízkých venkovních teplotách nesmí klesnout hodnoty viskozity pod určitou hodnotu, jinak může dojít k selhání systému chlazení transformátoru (olej tuhne).



2) Kabelové – mají **červenohnědou barvu**. Při impregnaci ($115 - 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) musí být jejich **viskozita nízká**, aby olej **dobře zatekl do dutin**. V **provozních podmínkách** (nižší teplota) musí být **viskozita maximální**, aby olej **nestékal**. Používají se k napouštění izolace silových kabelů, případně do vypínačů. K impregnaci kabelů se nepoužívá olej samotný, ale **olejové kompaundy** (směsi) s **kalafunou**, nebo **syntetickými pryskyřicemi**, které snižují stékavost a prodlužují životnost izolace.



3) Kondenzátorové – mají **světle žlutou barvu** a napouští se jimi papír tvořící dielektrikum kondenzátoru. Musí mít vysokou stabilitu $\tan \delta$ a ϵ_r .



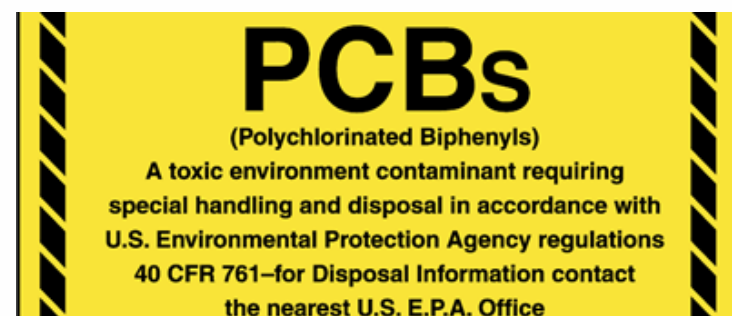
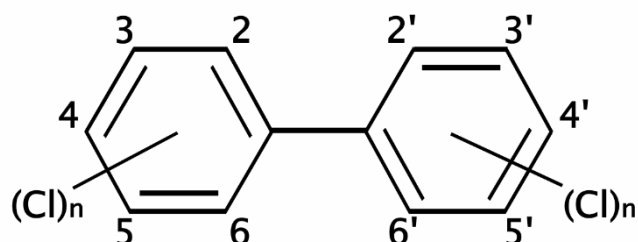
7.3.3.3 Syntetické kapaliny

Syntetické kapaliny byly připraveny jako náhrada **hořlavých minerálních olejů**. Mají vedle **výborných izolačních a dielektrických vlastností** také **vynikající vlastnosti chemické**. Jsou **nehořlavé, nevýbušné a prakticky nestárnou**. Ve srovnání s minerálními oleji **jsou drahé** a některé z nich **mohou škodit lidskému zdraví** a mohou být také **ekologicky závadnými**.

Podle způsobu přípravy a složení je lze dělit na:

1) Polybutyleny (*kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků*) – vyznačují se **stabilitou i při vyšších teplotách** a **dobrymi elektroizolačními vlastnostmi**. Jsou to **nepolární látky**, odolné proti záření a oxidaci a jsou **ekologicky nezávadné**, používají se jako *náplně kabelů a impregnace svitkových kondenzátorů*.

2) Chlorované uhlovodíky (*polychlorované bifenyly, PCB*) – jsou **ekologicky a zdravotně závadné**. Používaly se v minulosti, nyní je jejich použití **zakázané**.



3) Fluorované uhlovodíky (*HFC*) – mají oproti minerálním olejům **četné přednosti**, ale jsou **ekologicky závadné**. Jejich vlastnosti jsou velmi stálé do 500 °C, ale při výbojích se **uvolňují fluorované plyny**. Používají se jako náplň do transformátorů a ve výkonových spínačích, kde se uplatňují i jejich **zhašecí účinky**. Jejich **použití je v současnosti omezováno**.

4) Kapaliny na bázi přírodních esterů (*organické estery*) – jedná se o **oleje syntetizované z rostlinných organismů** (např. ze *sóji, slunečnice, řepky* aj). Jsou **ekologicky nezávadné**. Jejich dielektrické vlastností jsou podobné minerálním olejům. Ve srovnání s nimi **mají vyšší viskozitu** (= jsou **méně efektivní pro přenos tepla**) a jsou **méně odolné vůči oxidaci**. Používají se pro plnění vf kondenzátorů nebo transformátorů.



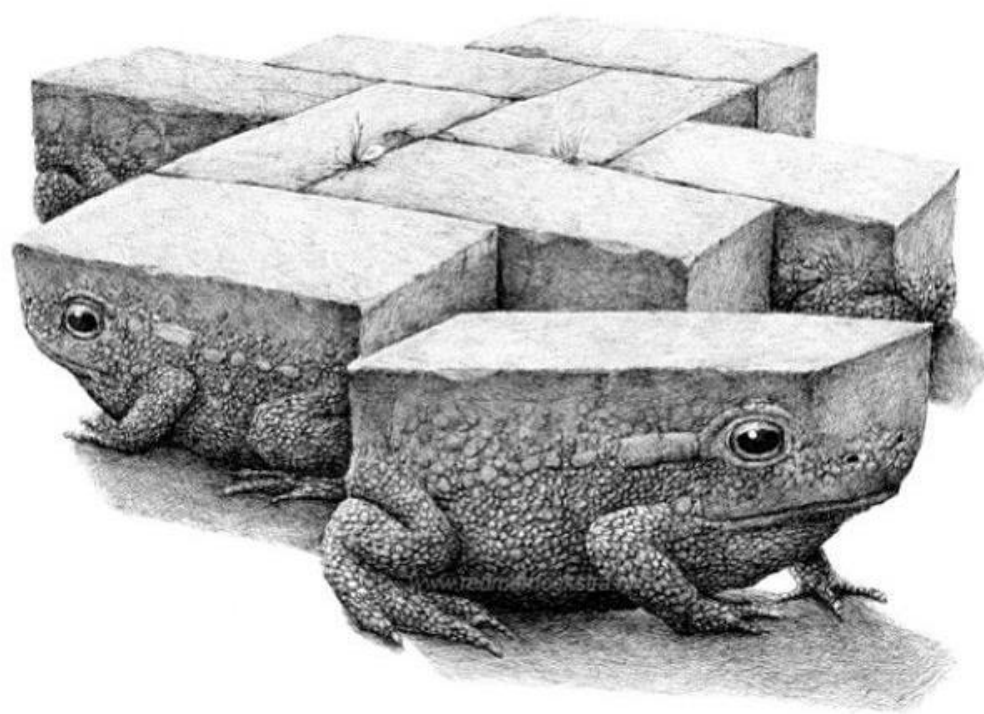
5) Silikonové kapaliny – jsou **ekologicky nezávadné**, nejsou hořlavé, jsou tepelně stálé v širokém rozmezí teplot a vyznačují se výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Jsou **drahé**.

7.3.4 Pevné izolanty (*organické, anorganické*)

Pevné izolanty zahrnují **velké množství látek**, nejvíce ze všech izolanů.

Pevné izolanty dále dělíme na:

- **Organické přírodní látky** (*šelak, kalafuna, kopál, jantar, celulóza, pryž...*).
- **Organické syntetické látky** (*polymerní materiály*) – **Přednáška č. 8.**
- **Anorganické amorfnní látky** (*skla*).
- **Anorganické polykrystalické látky** (*slída, keramika*).
- **(Anorganické krystalické látky)** (*speciální dielektrika, například pyroelektrika, piezoelektrika*) - jejich detailní popis **není** náplní předmětu MTE.



ORGANIC COMPOUNDS VERSUS INORGANIC COMPOUNDS

Organic compounds are compounds essentially having carbon atoms in the structure along with other atoms

Mainly show covalent bonding

Essentially have C and H hydrogen atoms

Most compounds are colorless

Most do not dissolve in water due to their hydrophobicity

Inorganic compounds are compounds that do not essentially have carbon atoms in their structure

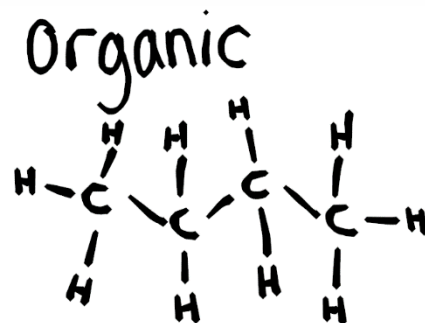
Show ionic bonding along with covalent bonding

Can have any atom except C and H directly bonded together

Most compounds are colorful

Most can dissolve in water due to the presence of ionic bonds

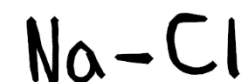
Visit www.pediaa.com



Contains carbon and hydrogen

Uses covalent bonds

Inorganic



Ionic or covalent

no -CH groups

Organic



carbs

proteins



fats

Inorganic



salts

water



oxygen

7.3.4.1 Organické přírodní látky

Sloučeniny *uhlíku*, *kyslíku* a v menším množství i *dalších prvků*. Mohou být **nízkomolekulární** nebo **vysokomolekulární** (*přírodní polymery*). Dále je dělíme na (i) **přírodní pryskyřice živočišného nebo rostlinného původu**, (ii) **materiály na bázi celulózy** a (iii) **přírodní a syntetické pryže**.

1) Přírodní pryskyřice živočišného nebo rostlinného původu – jsou **mírně polární** ($\epsilon_r = 2,5 - 3$) s **vysokou vnitřní rezistivitou** ($10^{12} - 10^{15} \Omega \cdot m$).

Šelak je pryskyřice živočišného původu. Vzniká zpracováním výměšků červce *lakového*.

Červec lakový prostřednictvím tohoto sekretu ochraňuje svoje larvy před vlivy okolí.

Používá se jako *pojivo pro výrobky ze štípané slídy (mikanity)* a jako *přísada do elektroizolačních laků*.



Kalafuna je čerstvá pryskyřice rostlin a stromů. Používá se v kabelovém průmyslu pro přípravu *kabelových impregnačních hmot*, jako surovina při výrobě *elektroizolačních laků* a jako *tavidlo při pájení*.

Kopál je tvrdá, čerstvá nebo středně fosilní pryskyřice rostlin a stromů. Jedná se vlastně o nevyzrálý, částečně zpolymerovaný jantar. Používá se jako *příísada k olejovým lakům* pro vytvrzení lakového filmu.

Jantar je nejtvrdší fosilní pryskyřice rostlin a stromů s výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Má největší rezistivitu ze všech izolantů vůbec. Jeho elektrická pevnost je asi $200 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Používá se pro *izolace velmi citlivých přístrojů*.



Kalafuna



Kopály



Jantar

2) Materiály na bázi celulózy – jedná se především o papírové a textilní izolace. Celulóza je *polymerovaný uhlohydrát* a jedná se o hlavní stavební látku rostlinných buněčných stěn. Je poměrně silně polární ($\epsilon_r = 6,5 - 7$) a má vyšší dielektrické ztráty ($\text{tg } \delta$ cca $0,005 - 0,01$). Materiály na bázi celulózy, v důsledku své polárnosti, snadno navlhají a podstatně mění svoje elektroizolační vlastnosti.

Elektrotechnický papír je vyráběn z buničiny (= *celulóza* + další *doprovodné látky*). Je jedním z nejužívanějších izolanů silnoproudé elektrotechniky. Zpracovává se na papírenských strojích. Pro zlepšení elektrických vlastností je nutné jej impregnovat olejem nebo lakovat. Lakovaný papír má $E_p = 35$ až $60 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ a rezistivitu $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$. Používá se jako *izolace v kondenzátorech, v silnoproudých i slaboproudých kabelech*.



Vlákna přírodní celulózy



Čtverečky z buničiny

Výrobky z
elektrotechnického
papíru



Lepenky se vyrábí na speciálních strojích jako nehlazené nebo lesklé (kalandrované). Podle použití rozlišujeme např. *lepenku obyčejnou, lesklou, drážkovou a transformátorovou*.



3) Přírodní a syntetické kaučuky (pryže) – jedná se o významné přírodní izolanty. Zdrojem je latex (šťáva z *kaučukovníku* s 30 až 40 % částechek *kaučuku*), ten se sráží na surový kaučuk, jehož lepkavost je dále snižována vulkanizací pomocí *síry*, vzniká tak **přírodní kaučuk**.



Podle obsahu síry dělíme **přírodní kaučuk** na měkký (2,5 % síry, *pro izolace vodičů a kabelů, průchodky, těsnění apod.*) a tvrdý (40 – 50 % síry, *např. pro výrobu izolačních trubek*). Nevýhodou přírodního kaučuku je jeho nízká teplotní odolnost a nízká odolnost vůči chemickému stárnutí.

Syntetické kaučuky se vyrábějí z destilačních produktů ropy jako náhrada přírodního kaučuku. Mají vyšší teplotní odolnost, jsou mrazuvzdorné až do -80 °C. Často se používají v kombinaci s přírodním kaučukem. Jedná se např. o *butadienový, chloroprenový a silikonový kaučuk*. Vzhledem k velké mrazuvzdornosti je lze využít *pro kabelové izolace určené do mrazu* (např. letecká technika).

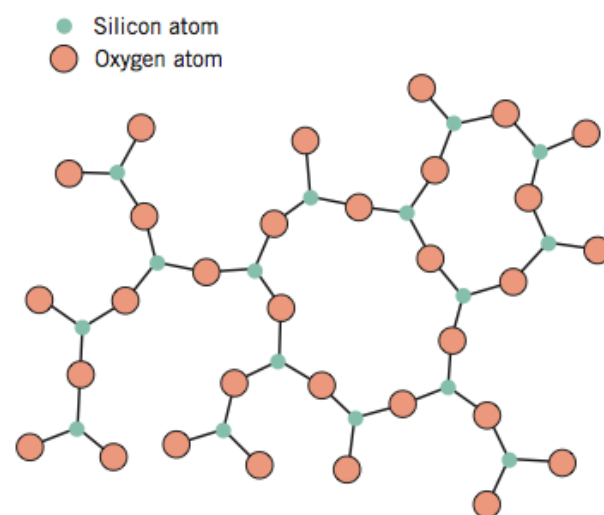
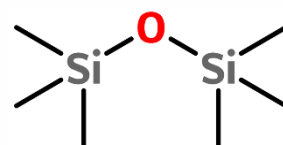


7.3.4.2 Organické syntetické látky (polymerní materiály)

Elastomery a plasty – pestrá skupina elektroizolačních materiálů, kterým se podrobně věnuje **Přednáška č. 8**.

7.3.4.3 Anorganické amorfní látky (skla)

Základem většiny anorganických izolačních materiálů jsou **křemičitany** (silikáty). Podstatou jejich struktury jsou skupiny **Si-O** s velmi pevnými chemickými vazbami.



Sklo má dobré izolační, mechanické i technologické vlastnosti. Vlastnosti skla **závisí na chemickém složení** (přísadách). Obecně považujeme skla za **polární materiály** s ϵ_r od **3,7** (typicky *křemenná skla* pro výrobu optických vláken a v.f. techniku) až **po 16** (typicky *skla olovnatá* pro vakuovou techniku). Rezistivita skla je v rozsahu $10^{12} \div 10^{18} \Omega \cdot m$. Dielektrické ztráty skel se pohybují v rozmezí $3 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-4}$. E_p je $200 \div 500 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Díky malé povrchové rezistivitě vedoucí k povrchové výbojové činnosti je však praktická hodnota E_p výrazně (až 8krát) menší.

Sklo nachází uplatnění jako **izolační** i **konstrukční materiál**. Významná je vedle **světelné propustnosti** a **vakuotěsnosti** skla zejména jeho **možnost stavování s kovy**, keramikou a slídou. Ve velké míře se uplatňují **borokřemičitá skla** ve formě skleněných vláken pro tkaniny nebo ve skleněných izolátorech pro venkovní rozvody elektrické energie.



7.3.4.4 Anorganické polykrystalické látky (slída, keramika)

Slída je polykrystalický minerál s výrazně vrstevnatou strukturou. Pro technické účely se využívá **muskovit** (slída draselná) a **flogopit** (slída hořečnatá). Mají **výborné elektroizolační vlastnosti**, které se liší ve směru roviny krystalu i ve směru kolmém.



Muskovit



Flogopit

Elektrická pevnost slídy ($\div 60 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$) je **závislá na obsahu vody**, její dielektrické ztráty ($\div 1$ až $3\cdot 10^{-4}$) a relativní permitivita (6 až 7) **na teplotě a frekvenci**. Slída se v elektrotechnice používá v následující formě:

- Izolanty z čisté slídy (bez pojiva)** se ve formě **štípaných destiček** využívají jako *dielektrikum v kondenzátorech* nebo jako *podložky pod výkonové součástky*.



- Vrstvené izolanty ze štičané slídy (s pojivem)** mohou být **deskové** (*mikanity*, pro izolace elektrických strojů) nebo **svitkové** (*mikafolium*, např. na *ovíjení a nažehlování izolací cívek VN*).



Výrobky z čisté slídy nebo vrstvené izolanty ze štípané slídy zaujímají **poměrně malý objem výroby** slídových izolantů. Převážná část slídy se v elektrotechnice využívá ve formě tzv. **rekonstruované slídy**.

- **Izolanty z rekonstruované slídy** – jedná se o slídu rozmělněnou na jemné částechky a dále zpracovanou na papírenských strojích na tzv. **slídový papír** (*remiku*). *Remika je velmi křehká*, proto se používá ve formě **kompozitů**, v nichž je nutná **nosná složka a pojivo**.

Takto zpracovaná remika se vyrábí jako fólie nebo pásy a široce se využívá jako hlavní izolační systém elektrických strojů.



Keramika je jedním z **nejdůležitějších polykrystalických materiálů** pro elektrotechniku. Je zastoupena **velkým množstvím materiálů** od izolačních hmot až po speciální dielektrika. Výchozími surovinami jsou např. *kaolin, jíly, křemen, mastek, různé oxidy (hliníku, titanu, zinku...), voda, lisovací oleje, cement, pryskyřice* aj. Ve formě prášků se suroviny tvarují ve formách a vypalují v pecích. Základní technologickou operací pro všechny keramické materiály je **prášková metalurgie**.

Vyrobené keramické materiály se vyznačují obecně **dobrými elektroizolačními vlastnostmi, časovou stálostí vlastností a odolností proti vysokým teplotám**, proti náhlým změnám teploty, chemickým a povětrnostním vlivům a vlhkosti. Keramika je **tvrdá a křehká**.

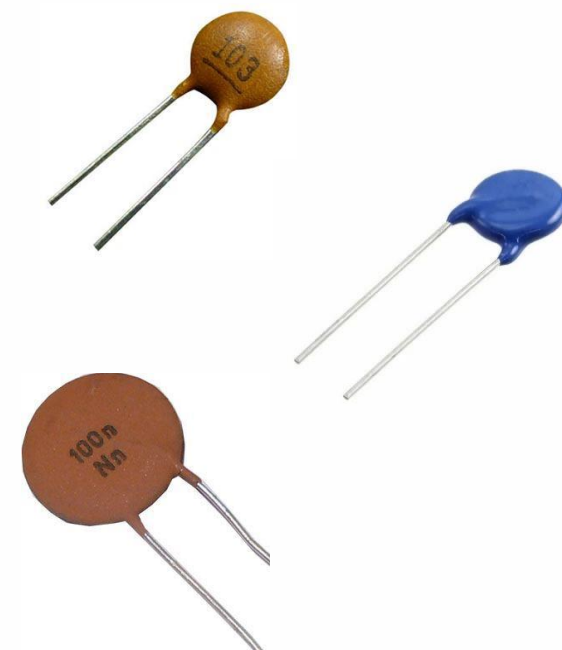


Druhy keramických materiálů pro elektrotechniku:

- **Porcelán** – vyrábí se z *jílu, kaolinu, křemene* a *živce*. Lze ho **používat do teploty 1100 °C**. Je málo nasákavý, teplotně stálý. Vykazuje velké dielektrické ztráty, a proto **je nevhodný pro vysoké frekvence**. Používá se pro *izolátory na venkovním el. vedení*, pro *průchodky u transformátorů* nebo jako *nosník v tepelných spotřebičích* (el. sporáky, teplomety apod.).
- **Steatit** – hlavní surovinou je *mastek*. Má dobrou mechanickou pevnost a el. vlastnosti i při vyšších teplotách než porcelán. Má **malé dielektrické ztráty při vyšších frekvencích**, proto je vhodný k použití v *měřicích přístrojích, relé, elektrotepelných zařízeních* i pro vysoké frekvence. Používá se též pro *keramická ochranná pouzdra* pro uložení tavného drátu výkonové pojistky.

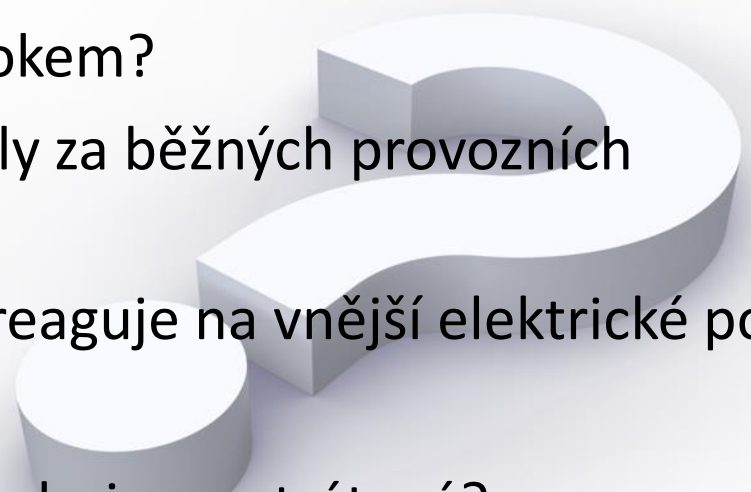


- **Stealit** – se označuje jako *maloztrátový steatit*. Má **ještě lepší elektrické vlastnosti než steatit**. Používá se např. *pro kostry cívek pro vysoké frekvence*.
- **Kamenina** – má chemické **složení podobné jako porcelán**, vyrábí se z **méně čistých surovin**. Má elektrické i mechanické vlastnosti **horší než porcelán**. Používá se pro *výrobu velkých izolátorů*.
- **Oxidická keramika** (*berylnatá, zirkoničitá, korundová, lithná*) – je **teplotně stálá s vysokou teplotní odolností (až 2 000 °C)**. Používá se na *součástky, které jsou silně tepelně namáhané, nebo vystavené velkým změnám teploty*.
- **Keramika pro kondenzátory** se dále dělí podle **závislosti permitivity na teplotě**:
 - **materiály s lineárním průběhem**: *stabilit, rutilit a negatit* (používají se pro kondenzátory pro stabilní vf obvody);
 - **materiály s nelineárním průběhem**: *permitit* (kondenzátory pro blokovací účely), tyto materiály mají **vysokou relativní permitivitu**.



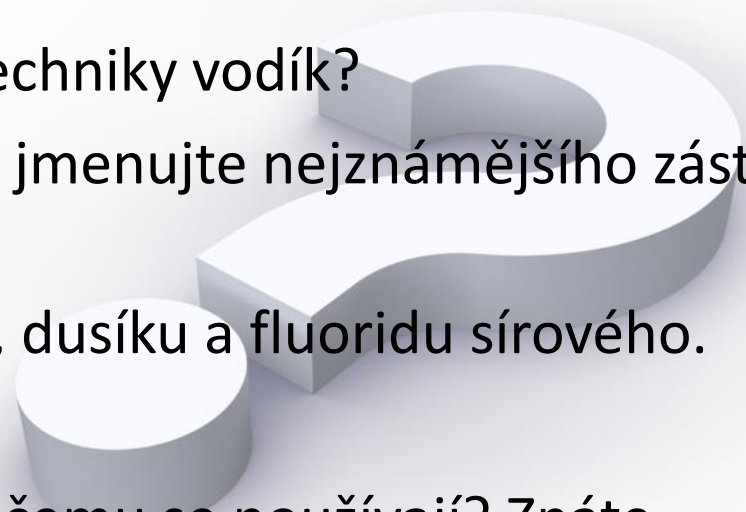
Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi dielektrikem a izolantem?
- Jaké rozhodující el. vlastnosti vyžadujeme po elektroizolačních materiálech?
- Za jakých podmínek je plyn dobrým izolantem a proč?
- Jak mohou v plynu vznikat volné nosiče náboje?
- Jaké jsou rozdíly mezi chováním plynu a kapaliny při interakci s vnějším el. polem?
- Jaký je rozdíl mezi el. průrazem a přeskokem?
- Jak to, že pevné elektroizolační materiály za běžných provozních podmínek vedou el. proud?
- Co je to „nepolární dielektrikum“ a jak reaguje na vnější elektrické pole?
- Co je to „lineární dielektrikum“?
- Jmenujte pružné polarizace. Jsou tyto polarizace ztrátové?
- Jaký je rozdíl mezi ztrátovým úhlem a ztrátovým činitelem?



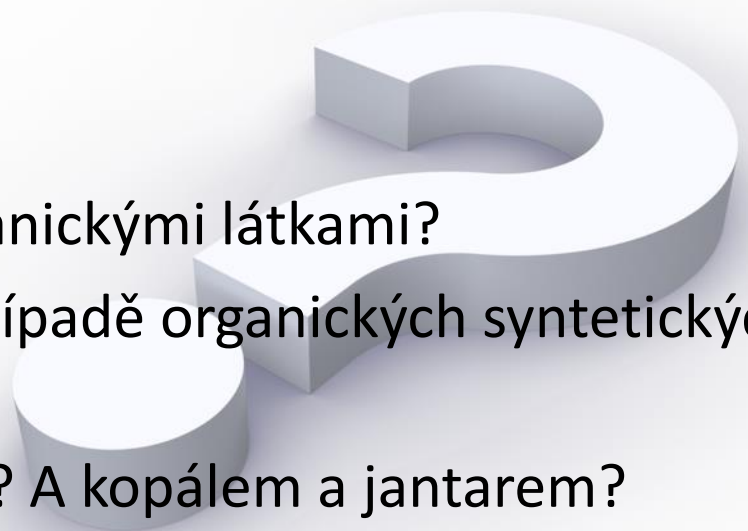
Kontrolní otázky

- Co je to prosakující proud? Co jej způsobuje?
- Jaký je rozdíl mezi elektrickou pevností a průrazným napětím?
- Co jsou to „teplotní třídy“ elektroizolačních materiálů?
- Jak dělíme izolanty do jednotlivých skupin a podskupin?
- Seřadte jednotlivá skupenství elektroizolačních materiálů dle velikosti jejich elektrické pevnosti.
- K čemu se používá dusík v elektrotechnice?
- V čem vyniká v oblasti elektroizolační techniky vodík?
- Popište, co je to elektronegativní plyn a jmenujte nejznámějšího zástupce této skupiny izolantů.
- Porovnejte vlastnosti a použití vzduchu, dusíku a fluoridu sírového.
- Z čeho se vyrábí rostlinné oleje?
- Co jsou to vysychavé rostlinné oleje a k čemu se používají? Znáte nějakého zástupce?



Kontrolní otázky

- Z čeho se získávají minerální oleje a jaké mají nevýhody?
- Porovnejte požadavky na hodnoty viskozity pro transformátorové a kabelové oleje.
- Jakými přísadami lze ovlivnit stékavost kabelových olejů?
- Které syntetické kapaliny jsou ekologicky závadné, případně zdraví škodlivé a které ne?
- Jaká je nevýhoda použití fluorovaných uhlovodíků? Používají se v elektrotechnice?
- Co jsou to organické estery?
- Jaký je rozdíl mezi organickými a anorganickými látkami?
- O jakou skupinu materiálů se jedná v případě organických syntetických látek?
- Jaký je rozdíl mezi šelakem a kalafunou? A kopálem a jantarem?
- Co je to červec lakový?



Kontrolní otázky

- Jakou zásadní nevýhodu mají široce používané materiály na bázi celulózy? A jak se tato nevýhoda eliminuje?
- Jak vysokých hodnot elektrické pevnosti může typicky dosahovat elektrotechnický papír a jakých např. jantar?
- Z čeho se vyrábí přírodní a z čeho syntetický kaučuk?
- Jakých hodnot dielektrických parametrů může typicky dosahovat sklo? Lze tyto hodnoty nějak zásadně ovlivnit?
- Používá se borokřemičité sklo na výrobu optických vláken?
- Co je to muskovit a k čemu se používá?
- Jaký je rozdíl mezi mikanitem a remikanitem?
- Jakou technologií se vyrábí keramika? Jaké má typické vlastnosti?
- Jaký je rozdíl mezi keramikou, porcelánem a kameninou?

