

Izolanty

Izolanty jsou látky, které na rozdíl od kovů neobsahují volně pohyblivé elektrony, a proto nevedou elektrický proud. V technické praxi se však s takovými absolutně nevodivými, tedy ideálními izolanty neseťkáváme. Na rozdíl od ideálních izolantů jsou technické izolanty za normálních podmínek nedokonalé. Obsahují vždy malé množství iontů a elektronů, které se mohou působením vnějšího elektrického pole pohybovat. Technický izolant je v malé míře vodivý.

Druhy izolantů podle skupenství <ul style="list-style-type: none">– pevné (keramika, vosk, polystyrén)– kapalné (olej, lak)– plynné (vzduch, vzácné plyny)
Druhy izolantů podle původu <ul style="list-style-type: none">a) anorganické – slída, azbest, sklo, keramikab) organické:<ul style="list-style-type: none">– rostlinné – celulóza– živočišné – hedvábí, včelí vosk– syntetické – reaktoplasty (fenoplasty) termoplasty (polystyrén) elastomery (kaučuk)
Druhy izolantů podle vzniku <ul style="list-style-type: none">– přírodní– syntetické

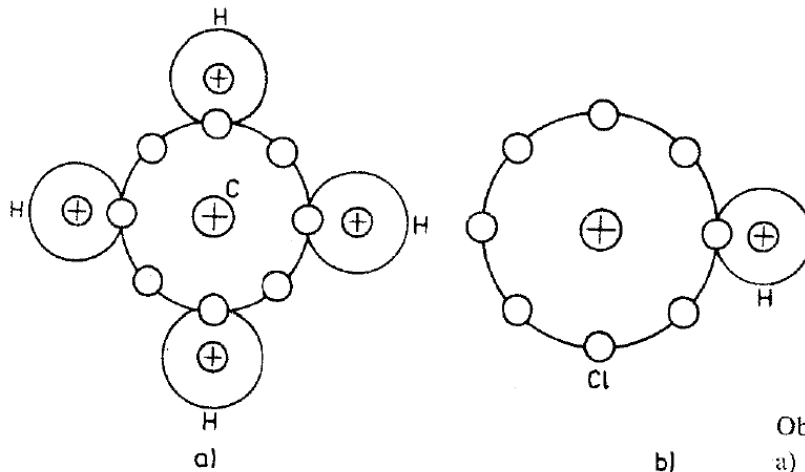
Teorie vodivosti izolantu

Na základě pásového energetického modelu pro izolant potřebuje elektron k převedení z pásu valenčního do vodivostního větší energii než 3 eV, nestačí ji však dodat ani vnější elektrické pole běžné velikosti, ani normální teploty okolního prostředí.

Struktura izolantů

V molekulách izolantu jsou elementární částice s elektrickým nábojem vázány iontovou nebo kovalentní vazbou. Podle způsobu uspořádání elektricky vázaných nábojů v molekulách látek se rozlišují molekuly (látky) nepolární a polární.

Nepolární (neutrální) molekuly se vyznačují souměrným rozložením kladných a záporných nábojů. Těžiště nosičů obou druhů nábojů splývají. Příkladem jsou molekuly prvků, např. kyslíku, nebo molekuly sloučenin, např. metanu, etylénu.



Obr. 26. Druhy molekul
a) nepolární, b) polární

Polární (dipólové) molekuly se vyznačují nesouměrným rozložením kladných a záporných nábojů. Takové molekuly vytvářejí i v nepřítomnosti elektrického pole elektrické dipóly, které se vyznačují trvalým elektrickým momentem $M=Q \cdot l$ kde l je vzdálenost těžišť nosičů obou nábojů.

Příčina trvalého elektrického momentu dipólu je v povaze chemických vazeb a v prostorovém uspořádání atomů v molekulách. Dipóly jsou v izolantu nepravidelně uspořádány, takže jejich účinek se navenek ruší. Příkladem je molekula kyseliny solné (obr. 26b).

Molekuly nízkomolekulárních látek (např. transformátorového oleje) obsahují málo atomů, zatímco molekuly makromolekulárních látek, nazývané makromolekuly, jsou tvořeny velkým počtem až několika tisíci atomů.

Základní vlastnosti izolantů

Izolanty používané v elektrotechnické praxi mají své typické vlastnosti fyzikální, chemické a technologické, K jejich základním vlastnostem patří vlastnosti elektrické, tepelné a mechanické.

Polarizace dielektrika

Dielektrikum je izolant umístěný mezi vodivými elektrodami kondenzátoru. V elektrickém poli se dielektrikum polarizuje. Působením sil elektrického pole při polarizaci zaujímají elektricky vázané náboje dielektrika nové rovnovážné polohy. Tyto polohy jsou v malé vzdálenosti od rovnovážných poloh původních.

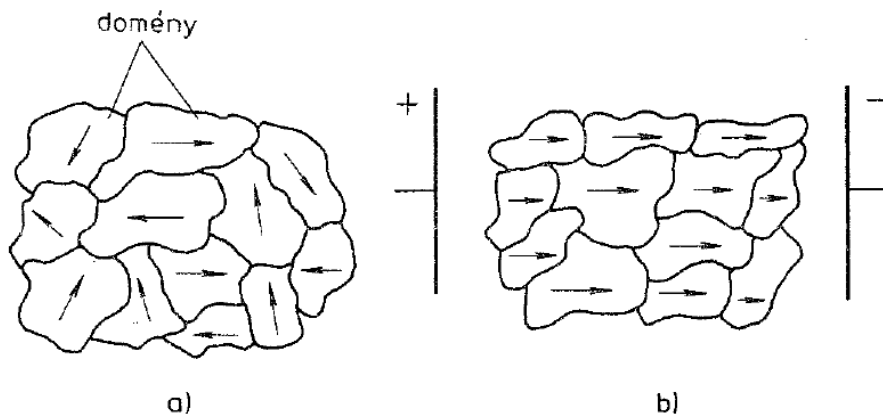
Působením elektrického pole na dielektrikum s nepolárními molekulami přestává být těžiště kladných a záporných nábojů společné, neutrální molekuly vytvářejí elektrické dipóly a získávají elektrický moment.

Účinkem elektrického pole na dielektrikum s polárními molekulami se natáčí jednotlivé dipóly ve směru elektrického pole. Původní trvalý elektrický moment se zvětšuje o přídavný moment.

Po zániku elektrického pole se částice vracejí do původní polohy. Pohybem částic vzniká až do okamžiku rovnováhy elektrický, tzv. posuvný proud. Přitom dochází v dielektriku ke ztrátám energie.

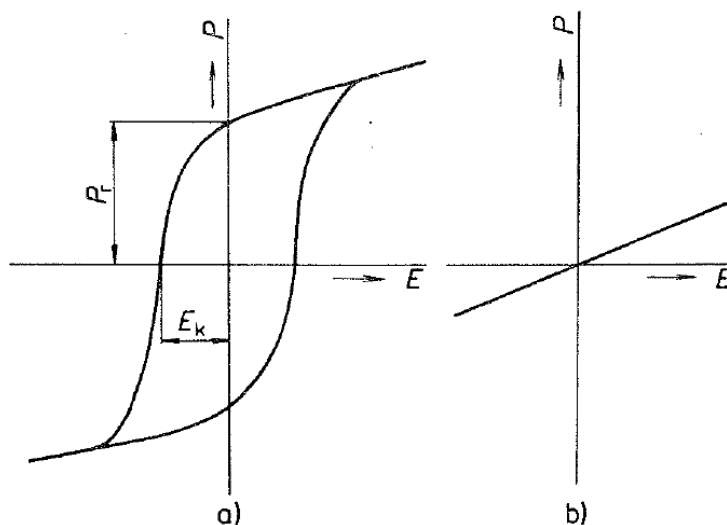
Rozlišuje se několik druhů polarizací. Pružná polarizace, k níž patří polarizace elektronová a iontová, probíhá rychle, pružně, bez ztrát energie v dielektriku. Relaxační polarizace probíhá pomalu. Dále rozlišujeme polarizaci mezivrstvou a rezonanční.

Spontánní (samovolná) polarizace se vyskytuje u látek, které mají doménovou strukturu. Tuto strukturu mají např. pyroelektrické látky, z nichž největší význam mají látky feroelektrické. Domény jsou oblasti, které jsou polarizované bez působení vnějšího elektrického pole. Výsledné elektrické momenty jednotlivých domén jsou uspořádány tak, že se navzájem ruší a látka se jeví jako nepolarizovaná. Teprve působením vnějšího elektrického pole dochází k takovému uspořádání domén, že se látka jeví jako polarizovaná (obr. 27b).



Obr. 27. Doménová struktura feroelektrických látek
a) bez působení elektrického pole, b) v elektrickém poli

Spontánní polarizace závisí na teplotě dielektrika a na intenzitě vnějšího elektrického pole. Grafické znázornění závislosti spontánní polarizace na intenzitě elektrického pole u feroelektrických látek tvoří hysterezní smyčka (obr. 28a); vyjadřuje zpoždění polarizace za intenzitou pole. Pro porovnání je uvedena tatáž závislost i pro normální (neferoelektrické) látky (obr. 28b).



Obr. 28. Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole u látek
a) feroelektrických, b) neferoelektrických

S polarizací dielektrika souvisejí některé jevy, jako např. jev pyroelektrický, feroelektrický, piezoelektrický a elektretový. Společným znakem těchto jevů je to, že se vyskytují u látek s nenulovou polarizací při nulovém vnějším elektrickém poli. Hlediskem, podle něhož se uvedené jevy třídí, je příčina této nenulové polarizace. Rozlišují se tedy látky pyroelektrické, feroelektrické, piezoelektrické a elektretové. Elektrostrikční jev se vyskytuje u všech tuhých izolantů s krystalickou i amorfni strukturou.

Permitivita izolantu

Permitivita izolantu charakterizuje vliv elektrického pole na elektrický stav izolantu. Podle vztahu $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, se rozlišuje absolutní permitivita ϵ , permitivita vakua ϵ_0 a poměrná permitivita ϵ_r .

Poměrná permitivita ϵ_r , charakterizuje vlastnosti izolantu a je měřítkem jeho polarizace. Velikost poměrné permitivity závisí na druhu polarizace, na vnitřní stavbě izolantu a na polarizovatelnosti atomů a molekul. Může se měnit v závislosti na teplotě a frekvenci, popř. i na intenzitě elektrického pole.

Ze vztahu pro kapacitu kondenzátoru

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} = \epsilon_r C_0$$

je poměrná permitivita izolantu stanovena jako poměr

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

kde C je kapacita kondenzátoru, jehož dielektrikem je uvažovaný izolant s poměrnou permitivitou ϵ_r .

C_0 je kapacita kondenzátoru téhož uspořádání a rozměrů, jehož dielektrikem je vakuum.

Vzhledem k malému rozdílu mezi poměrnou permitivitou vakua ($\epsilon_r = 1$) a vzduchu ($\epsilon_r = 1,000\ 53$) je C_0 kapacita vzduchového kondenzátoru.

Kromě zmíněných tří druhů permitivit se v technické praxi vyskytuje ještě permitivita statická, komplexní a optická.

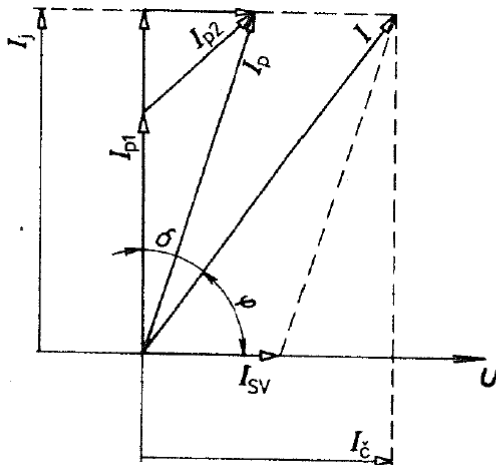
Velkou poměrnou permitivitu mají feroelektrické látky, např. titaničitan barnatý. Permitivita těchto látek závisí na teplotě a na intenzitě elektrického pole. Průběh poměrné permitivity ϵ_r v závislosti na teplotě vykazuje výrazné maximum při teplotě označované jako Curieův bod. Při teplotách nad tímto bodem zanikají feroelektrické vlastnosti látek.

Dielektrické ztráty

Jako dielektrické ztráty se označuje část elektrické energie, která se při působení elektrického pole v dielektriku rozptyluje, mění se v teplo, jímž se ohřívá dielektrikum. Tyto ztráty vznikají při působení stejnosměrného i střídavého napětí.

Ve stejnosměrném i střídavém elektrickém poli jsou ztráty způsobeny především elektrickou vodivostí dielektrika. Tato vodivost určuje velikost svodového proudu I_{sv} .

Ve střídavém elektrickém poli jsou ztráty způsobeny jednak vodivostí, jednak různými druhy polarizací. Následkem polarizace vzniká v dielektriku posuvný proud I_p .



Obr. 29. Fázorový diagram proudů a napětí pro izolant s dielektrickými ztrátami

I_{sv} – svodový proud, I_p – posuvný proud, I_{p1} , I_{p2} – složky posuvného proudu, I – celkový proud, U – napětí, I_j – složka celkového proudu I , která nenapomáhá vzniku ztrát, I_ϵ – složka celkového proudu I , vyvolávající ztráty, δ – úhel dielektrických ztrát

Fázor výsledného proudu I , který prochází izolantem v střídavém elektrickém poli, je dán složením fázorů I_{sv} a I_p . Tento proud I předbíhá ve fázorovém diagramu fázor napětí U o úhel fázového posunu φ . Doplnkový úhel k úhlu φ je ztrátový úhel δ . Velikost dielektrických ztrát se posuzuje podle činitele dielektrických ztrát $\text{tg } \delta$. Činitel ztrát se mění s frekvencí, teplotou a napětím.

Elektrický průraz dielektrika

Elektrické namáhání izolantu se posuzuje podle velikosti intenzity elektrického pole. Dosáhne-li při zvyšování napětí intenzita pole určité velikosti, dochází u izolantů pevného skupenství k průrazu, u izolantů kapalného nebo plynného skupenství k přeskoku. Napětí, při němž nastává průraz nebo přeskok, se nazývá průrazné napětí. Intenzita elektrického pole, příslušející tomuto napětí, se označuje jako elektrická pevnost E_p .

Je dána poměrem průrazného napětí U_p , k tloušťce izolantu d v místě průrazu podle vztahu

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

Elektrický průraz vzniká nárazovou ionizací atomů izolantu. Tuto ionizaci způsobují elektrony uvolněné při velké intenzitě pole z řádných vazeb mřížky a urychlené elektrickým polem. Následkem nárazové ionizace vzniká v určitém místě lavina elektronů, izolant ztrácí svoje elektroizolační vlastnosti a stává se elektricky vodivým.

Tepelný průraz může nastat u pevných izolantů s velkým činitelem ztrát. Takový izolant se v elektrickém poli následkem velkých dielektrických ztrát nadměrně ohřívá, neboť vzniklé teplo nestačí odvádět svým povrchem do okolí. Účinkem vysoké teploty začne izolant v některém místě uhelnatět, až se stane vodivým. Tepelný průraz na rozdíl od průrazu elektrického probíhá pomalu.

Elektrická vodivost izolantů

Elektrickou vodivost izolantů způsobují především volně pohyblivé ionty příměsí a nečistot, u izolantů s iontovou vazbou též ionty uvolněné z vlastní mřížky. Elektrony se podílejí na vodivosti teprve v silném

elektrickém poli, např. v oblasti elektrického průrazu nebo při vysokých teplotách.

Rozlišuje se několik druhů elektrického odporu izolantů: vnitřní odpor, povrchový odpor, izolační odpor, vnitřní rezistivita a povrchová rezistivita.

Tepelné vlastnosti

Tepelné namáhání izolantu vede ke zhoršení jeho elektrických a mechanických vlastností. Dále dochází k narušení struktury, a hlavně k rychlejšímu stárnutí. Na stárnutí závisí doba života izolantu, a tím i doba

života elektrického zařízení s ohledem na jeho spolehlivost a bezpečnost.

Podle teplotní odolnosti jsou izolanty zařazeny do teplotních tříd. Tyto třídy udávají mezní teplotu, tj. nejvyšší dovolenou teplotu, při níž se izolanty považují za teplotně stálé.

Mechanické vlastnosti

Mechanické namáhání izolantů se posuzuje vlastnostmi, které jsou vyjádřeny mechanickými veličinami. Mnohé z nich, např. různé druhy pevnosti, se používají při vyhodnocování mechanických zkoušek kovů.

Vliv vlhkosti na izolant

Navlhají hlavně pórovité a vláknité izolanty, zejména organického původu. Navlhnutím se zvětšuje jejich elektrická vodivost a dielektrické ztráty, zmenšuje se elektrická pevnost, zhoršují se mechanické vlastnosti. Následkem vlhkosti mohou procházet na povrchu izolantů tzv. plazivé proudy.

CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ

Poměrná permitivita

Poměrná permitivita ϵ_r , je bezrozměrná veličina. Její hodnota je u izolantů v rozmezí 1 až 10^4 . Pro vzduch má poměrná permitivita hodnotu 1, pro feroelektrické látky, např. permutity až 10^4 . Ještě větší hodnoty (10^5 až 10^6) mají polovodivé keramické látky zpracované zvláštní technologií.

Činitel dielektrických ztrát

Činitel ztrát $\text{tg } \delta$ je bezrozměrná veličina. Číselně se vyjadřuje desetinným číslem (např. 0,0002), násobkem mocniny deseti se záporným exponentem (např. $2 \cdot 10^{-4}$), nebo v procentech (např. 0,02 %).

Činitel ztrát je u izolantů v rozmezí 10^{-5} až 10^{-1} . Hodnotu 10^{-5} má vzduch. Běžně používané izolanty mají činitel ztrát v rozmezí 10^{-4} až 10^{-1} (slída $2 \cdot 10^{-4}$, tvrzený papír až $1\,000 \cdot 10^{-4}$),

Elektrická pevnost

Elektrická pevnost E_p ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) u běžných izolantů je v rozmezí 3 až 150 $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$. Vzduch má elektrickou pevnost pouze $3\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$, slída více než $100 \text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$.

Vnitřní rezistivita a povrchová rezistivita

Vnitřní rezistivita ρ_v , ($\Omega \cdot m$) u izolantů je v rozmezí 10^6 až $10^{18} \Omega \cdot m$. Velkou vnitřní rezistivitu má např. jantar (10^{15} * až 10^{17}) $\Omega \cdot m$.

Povrchová rezistivita ρ_p , (Ω). Vysokotlaký polyetylén má povrchovou rezistivitu $10^{14} \Omega$.

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita c látky je potřebná pro stanovení teploty izolace vinutí, které se dosáhne náhle, např. při zkratu. Měrná tepelná kapacita slídy je $860 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, vodíku $14350 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Měrná tepelná vodivost

Měrná tepelná vodivost λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je měřítkem schopnosti izolantu převádět teplo ve směru tepelného spádu; např. u elektrických strojů izolace odvádí teplo vzniklé ztrátami ve vinutí.

Měrná teplotní vodivost

Měrná teplotní vodivost a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ *) udává, jakou rychlostí se v látce vyrovnává teplotní rozdíl.

Teplotní součinitel délkové roztažnosti

Teplotní součinitel délkové roztažnosti je u křemenného skla $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, u transformátorového oleje $750 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Odolnost za tepla podle Martense a podle Vicata

Odolnost za tepla podle Martense udává teplotu ve stupních Celsia, při níž zkušební vzorek namáhaný na ohyb napětím 500 MPa dosáhne průhybu určité velikosti nebo se poruší. Stanovuje se u termoplastů i reaktoplastů.

Odolnost za tepla podle Vicata udává teplotu v Celsiových stupních, při níž ocelová jehla vnikne do zkoušeného izolantu do hloubky 1 mm. Stanovuje se jen u termoplastů.

Mez pevnosti v tahu a v tlaku

Mez pevnosti v tahu σ_{Pt} , se vyjadřuje podle druhu izolantu různými způsoby. U některých izolantů se určuje podobně jako u kovů. U papíru nebo vláken se udává mez pevnosti v tahu tržnou délkou.

Mez pevnosti v tlaku σ_{Pd} se určuje např. u vrstvených izolantů ve směru podélném a příčném. Mez pevnosti skel v tlaku je až 2000 MPa, kdežto v tahu nejvýše 100 MPa.

Tvrдость

Tvrдость udává odpor materiálu proti vnikání tělesa, kterým je nejčastěji ocelová kulička, diamantový kužel nebo jehlan. Stanovuje se metodami podle Brinella (HB), Rockwella (HR), Vickerse (HY). Tvrдость HMo (podle Mohse) se udává tvrdost nerostů. Odrazová tvrdost HS se stanovuje podle Shoreho.

Viskozita

Rozlišujeme viskozitu dynamickou η (Pa. S) a viskozitu kinematickou ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Viskozita se stanovuje pro oleje a laky.

Navlhavost a nasákavost

Navlhavost je schopnost izolantu přijímat vlhkost z okolního vzduchu. Nasákavost je schopnost izolantu přijímat vodu. Nasákavost je vždy větší než navlhavost.

Anorganické izolanty

- Slída
- Keramika
- Sklo

Organické izolanty

- Termoplasty
- Reaktoplasty
- Elastomery
- Dřevo, celulóza, papír, lepenka
- Přírodní vláknina, tkaniny
- Vrstvené tvrzené materiály
- Laky

Tabulka 12. Vlastnosti slídy

Veličina	Jednotka	Muskovit	Flogopit
Poměrná permitivita		6 až 7	5 až 6,5
Činitel ztrát		1 až $3 \cdot 10^{-4}$	až $50 \cdot 10^{-4}$
Vnitřní rezistivita			
– kolmo k vrstvám	$\Omega \cdot m$	10^{13} až 10^{14}	10^{11} až 10^{12}
– ve směru vrstev		10^6 až 10^7	10^5 až 10^6
Povrchová rezistivita	Ω	10^{11} až 10^{12}	10^{10} až 10^{11}
Elektrická pevnost při tloušťce 1 mm, 50 Hz	$MV \cdot m^{-1}$	40 až 60	
Nejvyšší provozní teplota	$^{\circ}C$	500 až 600	800 až 900
Teplota kalcinace	$^{\circ}C$	700 až 800	900 až 1 000

Tabulka 13. Základní vlastnosti některých termoplastů

Termoplast	Poměrná permitivita*	Činitel ztrát*	Elektrická pevnost (MV . m ⁻¹)	Vnitřní rezistivita (Ω . m)
Polystyrén	2,5	10 . 10 ⁻⁴	100	10 ¹⁵
Polymethylmetakrylát	2,5	300 . 10 ⁻⁴	20	10 ¹²
Polyamid	3,7 až 5	300 . 10 ⁻⁴	15 až 18	10 ¹¹ až 10 ¹³
Lineární polyuretan	3,3 až 3,6	200 . 10 ⁻⁴	20	10 ¹⁴
Polyformaldehyd	2,6 až 3	2 . 10 ⁻⁴	100	10 ¹⁷
Polykarbonát	2,9	13 . 10 ⁻⁴	35	> 10 ¹⁵
Lineární polyester	3 až 3,5	20 . 10 ⁻⁴	30 až 120	10 ¹³
Polyetylén	2,2 až 2,3	1 . 10 ⁻⁴	80	> 10 ¹⁵
Polypropylén	2,3	10 . 10 ⁻⁴	80	10 ¹⁴
Polytetrafluoretylén (teflon)	2,0	6 . 10 ⁻⁴	50	10 ¹²
Polytrifluorchloretylén (teflex)	2,7	100 . 10 ⁻⁴	40	10 ¹²
Polyvinylchlorid měkčený	3,4	1 000 . 10 ⁻⁴	50	10 ⁹
Polyfenylenoxid	2,6	7 . 10 ⁻⁴	20	2 . 10 ¹⁵

* při frekvenci 1 MHz

Tabulka 14. Základní vlastnosti minerálních olejů

Veličina	Jednotka	Olej		
		transfor- mátorový	kondenzá- torový	kabelový
Hustota max.	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	900	920	910
Kinematická viskozita při 20 °C max.	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	40	40	min 305 při 50 °C
Bod tuhnutí max.	°C	-40	-40	-8
Bod vzplanutí min.	°C	135	130	220
Poměrná permitivita při 20 °C	—	2,1 až 2,4	2,1 až 2,25	
Činitel ztrát při 20 °C max. v dodaném stavu při 70 °C max.	—	$150 \cdot 10^{-4}$ —	$12 \cdot 10^{-4}$ —	— $70 \cdot 10^{-4}$
Elektrická pevnost v dodaném stavu po vysušení trvajícím 30 min při 105 °C	$\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$	min. 9,2 min. 20	— min. 20	— —