

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ELEKTRICKÁ VODIVOST IZOLAČNÍCH
MATERIÁLŮ**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek CHVOSTA**
Osobní číslo: **E13B0119P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Elektrická vodivost izolačních materiálů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte rozdělení izolačních materiálů a jednotlivé zástupce aplikovatelné v elektrotechnické praxi.
2. Pro plynné, kapalně a pevné izolační materiály popište fyzikální principy elektrické vodivosti.
3. Popište aspekty ovlivňující elektrickou vodivost izolačních materiálů.
4. Stanovte diagnostický systém pro měření elektrické vodivosti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. Mentlík, V. et al. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. Kao, K. Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes. Boston: Academic Press, c2004, xvii, 581 p. ISBN 0123965616.
4. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore apod.).

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Hornak


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na elektrickou vodivost izolačních materiálů. Jsou v ní vyjmenovány typy izolačních materiálů z pevných, kapalných a plynných látek a popsány jejich vodivosti v jednotlivých skupenstvích. Poté je navržen diagnostický systém pro měření elektrické vodivosti pevných izolantů. Byla změřena elektrická vodivost izolačních materiálů a bylo provedeno zhodnocení jejich elektrické vodivosti.

Klíčová slova

Izolační materiál, elektrická vodivost, iontová vodivost, elektroforetická vodivost, vnitřní rezistivita, povrchová rezistivita, absorpce, resorpce, pevné izolanty, kapalně izolanty, plynné izolanty.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the electrical conductivity of insulating materials. Types of solid, liquid and gaseous substances have been listed there. Moreover, the electrical conductivity in the individual states has been described. After that a diagnostic system for the electrical conductivity measuring of the solid insulators has been designed. The electrical conductivity of insulating materials has been measured and the evaluation of their electrical conductivity has been performed.

Key words

Insulating material, electrical conductivity, ion conductivity, electrophoretic conductivity, volume resistivity, surface resistivity, absorption, desorption, solid insulators, liquid insulators, gaseous insulators

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 30.5.2016

Marek Chvosta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Jaroslavovi Hornakovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení bakalářské práce.

Obsah

Obsah.....	8
Úvod.....	10
Seznam symbolů a zkratk.....	11
1 Elektrotechnické izolační materiály.....	13
1.1 Základní elektrické parametry charakterizující izolační materiály.....	13
1.2 Pevné izolanty.....	15
1.2.1 Amorfnní anorganické pevné izolanty.....	15
1.2.2 Krystalické anorganické pevné izolanty.....	15
1.2.3 Přírodní organické pevné izolanty.....	16
1.2.4 Přírodní syntetické pevné izolanty.....	17
1.3 Kapalné izolanty.....	20
1.3.1 Minerální oleje.....	20
1.3.2 Syntetické kapaliny.....	21
1.3.3 Přírodní estery.....	22
1.4 Plynné izolanty.....	23
1.4.1 Vzácné plyny.....	23
1.4.2 Normální plyny.....	23
1.4.3 Plynné sloučeniny.....	24
1.4.4 Páry.....	25
2 Elektrická vodivost izolačních materiálů.....	26
2.1 Elektrická vodivost pevných izolantů.....	27
2.1.1 Iontové krystalické látky.....	27
2.1.2 Anorganické amorfnní látky.....	28
2.1.3 Organické amorfnní látky.....	28
2.1.4 Povrchová vodivost pevných izolantů.....	29

2.2	Elektrická vodivost kapalných izolantů.....	29
2.2.1	Iontová elektrická vodivost kapalných izolantů.....	31
2.2.2	Elektroforetická vodivost	31
2.3	Elektrická vodivost plynných izolantů	32
3	Aspekty ovlivňující elektrickou vodivost izolantů	35
3.1	Vliv prostředí a podnebí	35
3.2	Vliv teploty	36
3.3	Vliv světla.....	37
3.4	Vliv vlhkosti	37
4	Diagnostický systém	39
4.1	Základní aspekty diagnostiky izolantů	39
4.2	Absorpční a resorpční charakteristiky	40
4.3	Určení hodnot vnitřní rezistivity pro sledované materiály	41
4.4	Výsledky měření.....	42
4.5	Porovnání hodnot vnitřní rezistivity	48
	Závěr.....	49
	Seznam literatury a informačních zdrojů	50

Úvod

Izolační systém je nedílnou součástí elektrických zařízení. Je důležitý k izolování vodivých částí od nevodivých, ale také k ochraně před úrazem elektrickým proudem. Izolační systém může degradovat vlivem času i vnějších vlivů. Proto je nutné, aby byl diagnostikován, jelikož v případě poruchy izolačního systému může dojít ke zničení celého zařízení, nebo jak bylo už zmíněno, může dojít k újmě na zdraví. Následkem toho vznikají problémy z hlediska finančního, zdravotního a někdy i majetkového.

Abychom předcházeli těmto nepříjemnostem, je důležité provádět diagnostiku zařízení. Diagnostika je prostředek pro zjišťování a určení stavu zařízení. Slovo diagnostika vzniklo z řeckého slova diagnosis, což znamená rozpoznání nebo určení. V elektrotechnice se bavíme o diagnostice elektrotechnologické.

Vliv diagnostiky je znát už při výrobě. Jedná se o vstupní a poté o mezioperační kontroly, kde se včasným vyloučením špatných dílů zabrání dalším problémům ve výrobě. Po vyhotovení výrobku se diagnostika účinně využívá u výstupní kontroly. Ta omezuje prodej špatných výrobků a tím i záruční řízení a opravy spojené s nekvalitní výrobou na minimum.

V této bakalářské práci si popíšeme vodivost izolačních materiálů. Jejich hlavní vlastností je schopnost oddělit dvě místa s rozdílným potenciálem. Tyto materiály jsou částečně vodivé. U izolantů je elektrická vodivost neboli konduktivita od 10^{-8} do 10^{-20} S.cm⁻¹. Liší se podle skupenství materiálu a volných nosičů náboje.

Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Základní jednotka	Význam
d	[m]	Tloušťka
D	[C/m ²]	Elektrická indukce
δ	[°]	Ztrátový úhel
E	[V/m]	Intenzita elektrického pole
E _p	[kV/mm]	Elektrická pevnost
ε ₀	[F/m]	Permitivita vakua
ε _r	[F/m]	Relativní permitivita
I	[A]	Elektrický proud
I _p	[A]	Povrchový proud
γ	[S/m]	Konduktivita
γ _p	[S/m]	Povrchová konduktivita
m	[kg]	Hmotnost
R	[Ω]	Elektrický odpor
R _p	[Ω]	Povrchový elektrický odpor
S	[m ²]	Plocha elektrod
ρ	[Ω.m]	Rezistivita
ρ _v	[Ω.m]	Vnitřní rezistivita
t	[s]	Čas
tg δ	[-]	Ztrátový činitel
U	[V]	Elektrické napětí

U_p	[kV/mm]	Průrazné napětí
v	[m/s]	Rychlost
V	[m ³]	Objem
W_i	[kJ/mol]	Ionizační energie

1 Elektrotechnické izolační materiály

Pod pojmem izolant se myslí látka, která odděluje dvě prostředí s rozdílným potenciálem. Rozdíl mezi izolantem a vodičem spočívá v tom, že vodič vede elektrický proud, zatímco izolant tuto funkci nemá. Elektrický izolant prakticky nevede žádný proud. Používá se k izolaci vodivých částí elektrických obvodů, kabelů, strojů atd. Ideální izolant má teoreticky elektrický izolační povrchový a vnitřní odpor nekonečný, průraznou elektrickou pevnost nekonečnou a ztrátový úhel nulový.[1]

Platí, že izolanty jsou podmnožinou dielektrik. To znamená, že každý izolant je dielektrikum, ale ne každé dielektrikum je izolant. Izolanty dělíme podle skupenství na pevné, kapalné, plynné, podle původu na organické a anorganické a podle vzniku na přírodní a syntetické.[2]

1.1 Základní elektrické parametry charakterizující izolační materiály

Veličina, která nejvíce charakterizuje elektroizolační materiál, je elektrická pevnost E_p [kV/mm]. Jedná se o veličinu, která se používá při návrzích a konstrukci elektrických zařízení. Izolant musí zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s odlišným elektrickým potenciálem. Tuto vlastnost by mohlo splnit více materiálů, ale v případě elektrické pevnosti hraje roli i okolní prostředí a velikost přiloženého elektrického pole. Jestliže přiložené napětí překročí pro daný materiál charakteristickou kritickou mez, dojde k velkému nárůstu konduktivity a k výboji. Při vzniku výboje dojde u původně izolovaných míst ke vzniku vodivé cesty. V závislosti na skupenství mluvíme o průrazu a přeskoku. O průrazu mluvíme u pevných izolantů. Jedná se o jev, při kterém dojde k poklesu napětí, nárůstu proudu a zhoršení izolačních vlastností. O přeskoku mluvíme v případě plyných a kapalných izolantů. Při tomto jevu dojde také k poklesu napětí a k nárůstu proudu. Ke zhoršení izolačních vlastností v oblasti jevu dojde pouze dočasně. Plynné a kapalné izolanty mají vlastnost regenerace. Elektrická pevnost se spočítá pomocí průrazného napětí U_p [kV], což je kritické elektrické napětí přiložené na materiál, a tloušťky izolantu d [mm]. Pomocí těchto dvou hodnot získáme vztah pro elektrickou pevnost

$$E_P = \frac{U_P}{d} \quad 1$$

[1]

Dielektrické ztráty představují energii, která se při připojení střídavého elektrického proudu přemění na teplo. Vznikají i u stejnosměrného napětí. U ideálního izolantu vektor proudu předbíhá vektor napětí o 90° ($\varphi = 90^\circ$). U takového ideálního izolantu říkáme, že ztrátový úhel δ je rovný nule. U skutečného izolantu se však zmenší předstih proudu před napětím o určitý úhel δ , jenž nazýváme ztrátový. Lze ho vypočítat jako $\varphi = 90 - \delta$, nebo z poměru vodivosti γ a poměrné permitivity ε_r :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad 2$$

[3]

Další parametr charakterizující izolační materiály je relativní permitivita. Ta charakterizuje chování izolantů v elektrickém poli, schopnost polarizace. Je definována jako poměr kapacity kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem vůči kapacitě kondenzátoru s vakuem. Vztah tedy vypadá

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad 3$$

Další možnost, jak vyjádřit relativní permitivitu, je pomocí elektrické indukce \mathbf{D} a intenzity elektrického pole \mathbf{E} , kdy platí:

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad 4$$

Relativní permitivita závisí na dipólovém momentu atomu, množství v jednotce objemu a schopnosti natáčet se vlivem elektrického pole. Orientaci dipólu narušuje tepelný pohyb částic, a proto většina izolantů nemůže dosáhnout 100% orientace. Doba k natočení dipólů je dána časovou konstantou τ . Hodnota $1 / \tau$ udává kmitočet, do kterého polarizace stačí sledovat změny elektrického pole. [2]

1.2 Pevné izolanty

Pevné izolanty dělíme na anorganické a organické. Anorganické dále dělíme na amorfnní a krystalické, organické na přírodní a syntetické. V pevných izolantech se může vyskytovat jak elektronová, tak i iontová elektrická vodivost. U většiny izolantů je jedna z těchto vodivostí dominantní. [4]

1.2.1 Amorfnní anorganické pevné izolanty

Základem struktury je vazba Si (křemík) s O (kyslík). Amorfnní látky nemají pravidelnou krystalickou mřížku. O amorfnních látkách mluvíme jako o izotropních látkách, to znamená, že mají stejné fyzikální vlastnosti ve všech směrech. Mezi anorganické amorfnní látky patří různé druhy skel. Tato skla mají elektrickou vodivost v rozmezí asi 10^{-3} až 10^{-17} S.m⁻¹. Sklo s nejmenší elektrickou vodivostí je čisté křemičité (SiO₂). Elektrickou vodivostí ve sklech se myslí pohyb slabě vázaných iontů, které reagují na vnější elektrické pole. Technická skla se používají na izolátory, na průchodky nebo jako dielektrikum do kondenzátorů. Skleněnou izolaci dnes můžeme najít mnohem častěji než izolaci azbestovou. [3]

1.2.2 Krystalické anorganické pevné izolanty

Krystalické látky jsou látky, které mají pravidelně uspořádané krystalové mřížky. Toto uspořádání mají na velké vzdálenosti. Krystaly se obecně považují za látky anizotropní. Anizotropie je opak izotropie. Vlastnosti v různých směrech jsou různé. Mezi anorganické krystalické látky patří například azbest a slída. [3, 4]

Azbest má typické fyzikální a chemické vlastnosti, mezi něž patří nehořlavost a žáruvzdornost. Azbest má velkou tepelnou stálost. Používá se jako izolace až do 900 °C. Je velmi dobrým tepelným izolantem. K jeho roztavení dochází až při teplotách okolo 1100 °C. Měrný vnitřní odpor čistého azbestu je 10^{10} Ω.cm. Azbest je pevný a ohebný, čehož se využívá při výrobě izolačních látek, jako například azbestového papíru, který se používá jako mezi závitová izolace. Azbestová lepenka se využívá pro vnitřní izolaci krytů vypínačů. Azbest je karcinogenní látka, která způsobuje nebo napomáhá při rakovinovém bujení. [3, 4]

Další zástupce krystalických anorganických pevných izolantů je slída. Ta patří mezi klasické izolanty. Pod pojmem slída se myslí široká skupina minerálů. Slída je nevodivá,

nehořlavá, špatně tavitelná. Má velkou stálost při vysokých teplotách a výbornou elektrickou pevnost. Mezi dvě nejrozšířenější slídy patří muskovit a biotit. [2–4]

Muskovit (bílá slída, draselná slída) je bělo-šedé barvy, může mít i nažloutlou nebo načervenalou. Je používán jako žáruvzdorný materiál, tepelná odolnost 500-600 °C. Je odolný vůči všem kyselinám. Má vynikající mechanické a elektrické vlastnosti. Jeho vnitřní rezistivita ρ_v je 10^{15} - 10^{16} Ω .cm. Elektrická pevnost muskovitu je 60 kV.mm⁻¹. [2–4]

Biotit (tmavá slída), je typický svou tmavou barvou (černá, hnědá, černohnědá). Biotit je dobrý izolační a žáruvzdorný materiál, jeho tepelná odolnost je vyšší než u muskovitu (900-1000 °C). Je odolný i proti kyselinám a žáru. Jeho elektrická pevnost nabývá hodnot okolo 45 kV.mm⁻¹ a vnitřní rezistivita 10^{12} - 10^{14} Ω .cm. Oproti muskovitu je biotit ohebnější. [2–4]

Slída je hojně používaná v elektrotechnice. Používá se například jako elektroizolační materiál pro elektrické přístroje a točivé stroje, pro výrobu komutátorových kroužků, k výrobě kondenzátorů, kde slouží jako dielektrikum, a zejména ve vysokonapěťových izolačních systémech ve formě slídového papíru. [2–4]

1.2.3 Přírodní organické pevné izolanty

Přírodní organické pevné izolanty můžeme ještě rozdělit na živočišné a rostlinné. Organické látky jsou na bázi uhlíku. Mezi rostlinné přírodní organické izolanty patří například jantar, dřevo, kalafuna. [3]

Kalafuna je zbytek pryskyřice a získává se z buničiny. Je nerozpustná ve vodě, netečná vůči kovům a má vysoký izolační a vnitřní odpor, který bývá až 10^{15} Ω .cm. Elektrická pevnost kalafuny je 10 až 15 kV.mm⁻¹. Používá se při pájení, taje mezi 60-80 °C, a jako přísada do kabelových impregnačních hmot a elektroizolačních laků. [2, 4]

Jantar je fosilní pryskyřice s amorfni strukturou, s běžnou barvou zlatavě žlutou. Nejde rozpustit v žádném rozpouštědle. Jantar je nejtvrdší izolant s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,9$. Taje při 287 °C a je hořlavý. Jako izolant má největší izolační odpor, který se pohybuje mezi 10^{17} - 10^{19} Ω .cm. Jantar lze použít na izolování přívodů u elektrometrů.[3, 4]

Dřevo má dobré mechanické vlastnosti, ale v elektrotechnice ztrácí své uplatnění kvůli navlhavosti, hořlavosti, nehomogenosti. Proto se využívá například na sloupy telekomunikačních a silových vedení. Používají se dřeva, která mají velkou objemovou váhu a rovnoměrnou stavbu. K nim patří buk, dub, jasan a olše. Kdybychom chtěli dřevo

použit pro účely elektrotechnické, Muselo by se sušit při teplotách 100-120 °C a poté impregnovat. Jemně rozemleté dřevo se dá použít jako plnivo do lisovacích hmot, aby se zlepšily mechanické vlastnosti výlisků. Ze dřeva získáváme pryskyřici, přírodní kaučuk nebo papír. [3, 5]

Papír patří v elektrotechnice mezi nejvíce používané izolanty. Vyrábí se z buničiny, ze smrkového dřeva. Papír se používá u kondenzátorů jako dielektrikum. V tomto případě má elektrickou pevnost $E_p = 40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ před impregnací, po impregnaci olejem $300 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Papíry pro kondenzátory mívají tloušťku 20 až 100 μm . Dále se používá na izolaci silových kabelů, kde jeho elektrická pevnost po impregnaci dosahuje velikosti $80 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Tloušťka papíru na izolaci silových kabelů je 0,12 mm. Dále lze papír použít na izolování vodičů a transformátorů. [2, 4, 5]

Mezi živočišné přírodní organické izolanty můžeme zařadit šelak a hedvábí. Šelak se získává z výměšků červce lakového. Je odolný vůči kyselinám, ale v zásadách a v lihu se rozpouští. Na slunci tvrdne. Jeho relativní permitivita je 2,3-3,8, elektrická pevnost 20-30 $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ a vnitřní rezistivitu má 10^{15} až $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$. Používá se jako lepicí lak na slídové produkty a jako přísada do elektroizolačních laků. Šelak je fyziologicky nezávadný, bez zápachu, nejedovatý. [2, 3]

Hedvábí je získáváno z výměšku žláz motýla bource morušového. Výměšky na vzduchu rychle tvrdnou. Motýl je používá na výrobu kukly, z které se dá následně odmotat 300-900 metrů hedvábí. Přírodní hedvábí bylo postupně vytlačováno syntetickým, přesto si udržuje místo na trhu. Syntetické hedvábí se používá tam, kde je lepší pro specifické vlastnosti, například pro lepší izolační schopnost, specifickou hmotnost a menší navlhavost. [4]

1.2.4 Přírodní syntetické pevné izolanty

Mezi tento druh syntetických izolanů se řadí termoplasty, reaktoplasty, elastomery. V elektrotechnice mají plasy hojně využití, protože vyhovují celé řadě požadavků. Dají se použít jako dielektrikum, konstrukční materiál, ochranné nebo pouzdrící materiály a za určitých podmínek jako elektricky vodivý materiál. [2]

Termoplasty fungují tak, že při vyšších teplotách se uvolňují fyzikální vazby mezi makromolekuly a termoplasty se stávají tvárné, až kapalné a mohou se tvarovat dle potřeb. Po ochlazení se stávají pevnými. U termoplastů je výhodou, že tento proces lze opakovat.

Termoplasty jsou u sebe drženy pouze mezimolekulárními vazbami (van der Waalsovými). Lze mezi ně zařadit polyetylén, polyester, polystyren, polymetylmetakrylát, polyvinylchlorid a polyamidy. [3, 4]

Polyetylén se značí PE a je jedním z nejjednodušších termoplastů vyráběných polymerací. Je bez chuti, zápachu a je fyziologicky nezávadný. Je odolný vůči vodě, vodním roztokům a většině chemikálií, při normální teplotě je nerozpustný ve všech rozpouštědlech. Tepelná odolnost u něj dosahuje k 115 °C. Polyetylén je hořlavý, zná se ale i nehořlavý druh polyetylénu pod označením Rulan. Elektrická pevnost polyetylénu dosahuje hodnot 22 kV.mm⁻¹, pro kabelářské účely je E_P 50-60 kV.mm⁻¹, a jeho rezistivita dosahuje hodnot 10¹³ Ω. Požívá se na izolaci vysokofrekvenčních kabelů, na pláště podmořských kabelů a na ochranné kryty. Polyetylén je dnes nejpoužívanější polymer na světě. [2–4]

Polystyren (PS) vzniká polymerací styrenu. Má výborné elektroizolační vlastnosti, čehož se využívá v technice vysokých a ultravysokých frekvencí a dále se využívá jako dielektrikum u vysokofrekvenčních kondenzátorů. Polystyren je tvrdý, pevný, snadno lámavý (křehký) a má malou tepelnou odolnost, okolo 70 °C. Jeho elektrická pevnost je okolo 24,5 kv.mm⁻¹. Rezistivita tohoto termoplastu se pohybuje v rozmezí 4,7.10¹²-3,3.10¹³ Ω.m. Výhoda polystyrenu je, že je chemicky netečný, ale není odolný vůči benzenu. Polystyren je velmi hořlavý a citlivý na UV záření. Při stárnutí křehne a vznikají v něm trhliny. [2, 3]

Polymetylmetakrylát, označován jako PMMA, známý jako plexisklo, je průhledný syntetický polymer s vlastnostmi termoplastu. Elektrická pevnost polymetylmetakrylátu dosahuje hodnoty 20 kV.mm⁻¹. Jeho rezistivita je 10¹³ Ω.m. Je zcela bezbarvý, tvarovatelný při teplotě 130-140 °C. Je odolný vůči vodě, zředěným alkáliím a kyselinám. Proti koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům odolný není. Je zdravotně nezávadný. Jeho zápalná teplota je cca 460 °C a při hoření se rozkládá na oxid uhličitý a vodu. [2]

Polyvinylchlorid, zkratkou PVC, patří mezi nejpoužívanější a nejlevnější plasty. Vyrábí se polymerací vinylnchloridu. Používá se v měkčené i neměkčené podobě. Měkčená forma PVC se využívá na izolační kabelové pláště, hadice, ohebné vodiče a elektroizolační směsi. Neměkčená forma PVC se používá jako elektroizolační materiál, konstrukční díly, kryty, roury, přístrojové a rozvodné krabice. Neměkčený PVC má výborné izolační schopnosti. Elektrická pevnost tohoto PVC dosahuje 40-50 kV.mm⁻¹ a rezistivita má v

průměru hodnotu $2 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$. Při teplotě 60-80 °C neměkčený PVC měkne, při 100 °C jeho pevnost rychle klesá. Za normálních podmínek je PVC nerozpustný ve vodě a benzínu. [2–4]

Reaktoplast je hmota, která se teplem nebo zářením vytvrzuje. Vytvrzením se má na mysli vytvoření prostorové sítě v materiálu. Vlivem teploty nebo záření dojde k vzniku kovalentních vazeb mezi molekulami polymeru. Při vytvrzení získává plast vlastnosti, mezi které patří netavitelnost a nerozpustnost. Mezi reaktoplasty lze zařadit epoxidy, fenoplasty, aminoplasty a polyimidy. [3, 4]

Mezi nejznámější epoxid patří epoxidová pryskyřice. Epoxidové pryskyřice se nejvíce využívají ve strojírenství, elektronice a elektrotechnice. Lze je použít na lisovací hmoty, vrstvené izolanty, lepidla, elektroizolační laky a pro protikorozní ochranu. V elektronice se používají jako izolanty s vysokým tepelným namáháním a na zalévání transformátorů se železnými jádry. Epoxidové pryskyřice mají velkou odolnost proti vlhku, plísním a mají malou propustnost vodních par. Elektrickou pevnost mají v rozmezí hodnot 28-34 kV.mm⁻¹. Jejich rezistivita je kolem $10^{12} \Omega \cdot cm$. [2–4]

Polyesterové pryskyřice jsou kondenzační polymery, které se rozdělují na netvrditelné termoplastické a termosetické. Mezi netvrditelné polyestery se řadí například vyšší polymetylendikarbonové kyseliny a aromatické dikarbonové kyseliny. V praxi se tyto pryskyřice používají jen jako lakařské suroviny a měkčidla pro laky. Do termosetických polyesterů patří glycerínftalátová pryskyřice. Elektrická pevnost polyesterových pryskyřic je 10-18 kV.mm⁻¹ a rezistivita 10^{15} - $10^{16} \Omega \cdot cm$. V elektrotechnice je lze použít jako zalévací hmotu, na zalévání kabelových koncovek, drobnějších elektronických součástí a části elektrických strojů, jako bezrozpouštědlový impregnant a jako pojivo pro sklolaminátové výlisky. [3, 4]

Elastomery jsou pružné syntetické materiály, tuhnoucí chemicky buď polyadící nebo polykondenzací. Mají vysokou úroveň pružné deformace. Mezi elastomery patří kaučuky a pryže. Kaučuky jsou polymery, jejich proces vytvrzování se nazývá vulkanizace, což je chemická reakce kaučukové směsi a vulkanizačních činidel, z nichž nejlepší je síra. Po vulkanizaci vzniká pryž. Pryže jsou pružné a odolné proti cyklickému namáhání, nepropouští vodu. V elektrotechnice se používá pryž měkká a pryž tvrdá. Využívá se jako izolace kabelů a vodičů, pro výrobu laků nebo po vulkanizaci jako pevný nenavlhavý izolant. Elektrická pevnost pryže je 17-25 kV.mm⁻¹, butadienstyrenový kaučuk má E_p také

17-25 kV.mm⁻¹. Maximální provozní teplota u pryže a butadienstyrenového kaučuku je 75 °C. [2]

1.3 Kapalné izolanty

Kapaliny vznikají tavením pevné látky, nebo kondenzací plynů. Molekuly se v kapalinách pohybují hůře než v plynech, ale lépe než v pevných látkách. Pomocí své tekutosti, tepelné vodivosti a dobrým elektrickým vlastnostem dokážou kapalné izolanty plnit v elektrických zařízeních mnoho úloh. Jedná se především o úlohy izolační a chladičí. Kapaliny samy o sobě dobře vyplňují daný prostor a póry. Tohoto se využívá u vyplňování pórů tuhých izolantů. Kapalné izolanty dělíme na minerální oleje, syntetické kapaliny a přírodní estery. [4]

1.3.1 Minerální oleje

Základní surovina pro výrobu minerálních olejů je ropa. Ta je složená z uhlovodíků (asi 98%) a zbytek tvoří kyslík, dusík, soli, písek a voda. Uhlovodíky v ropě můžeme rozdělit na tři hlavní skupiny: alkanické uhlovodíky, cyklické uhlovodíky a aromatické uhlovodíky. Tyto tři skupiny jsou v ropě přítomny v různých poměrech a s různým obsahem kyslíkatých, sírných a dusíkatých látek, přičemž tyto látky jsou vestavěny do uhlíkové kostry. Podle použití můžeme rozdělit minerální oleje na kabelové impregnanty, transformátorové a spínačové oleje a na kondenzátorové oleje.[3, 4]

Kabelové impregnanty lze ještě rozdělit podle viskozity na viskózní oleje s kalafunou, viskózní oleje s polymery uhlovodíku, oleje se střední viskozitou, oleje s malou viskozitou a na viskózní oleje s mikrokrystalickými vosky. Každá skupina se používá u jiného typu kabelu pro určitou výšku jmenovitého napětí kabelu. Viskózní oleje s kalafunou se používají jako tekutá dielektrika pro kabely běžné konstrukce. Silový kabel běžné konstrukce má papírovou izolaci, napuštěnou uvedeným impregnantem. Přidání kalafuny do oleje se využívá pro zvýšení viskozity oleje a jeho stabilizaci. Oleje s malou viskozitou se využívají u olejových kabelů do vysokého napětí 35 kV. Tyto olejové kabely byly vynalezeny roku 1927 v Itálii. Jejich hlavním konstrukčním znakem je podélný kanál, který je tvořen buď dutým jádrem, nebo kanály mezi izolací a pláštěm, aby mohl olej snadno protékat a dobře pronikat do izolace. Olej v kabelu musí být pod tlakem 1 až 2 atmosféry, při vyšším napětí, než je 220 V, se doporučují vyšší tlaky. Oleje se střední viskozitou se využívají k impregnaci olejových tlakových kabelů. Naimpregnované žíly

jsou vtaženy do ocelového potrubí, které se naplní olejem. To umožní izolaci kabelu být v přímém styku s olejem v potrubí, který musí být pod tlakem 14 až 15 atmosfér. Viskózní oleje s polymery uhlovodíků se používají v kabelech velmi vysokého napětí (od 110 kV výše) s izolací z impregnovaného papíru. U nich funkci tlakového média zaujímá plyn, buď oddělený, nebo v přímém kontaktu s izolací. Viskózní oleje s mikrokrytalickými vosky, které jsou za běžné teploty tuhé, se využívají pro kabely montované ve svislé poloze. Impregnant nesmí stékat do níže položených míst kabelového vedení. Tyto požadavky splňují tzv. nemigrující impregnanry, které jsou složeny v podstatě z viskózních kabelových olejů obsahujících minimálně 50 % kvalitního ceresinu a 5 % destilované kalafuny. [3, 4]

Transformátorové a spínačové oleje se používají v transformátorech jako chladicí a izolační složka, jako zhášecí a protikorozi prostředek v olejových spínačích a jako izolant ve vysokonapěťových průchodkách. Tyto oleje se vyrábějí z ropy, z které se odstraní hrubé nečistoty, anorganické soli a voda. Takto vyčištěná ropa se v rafinerii podrobuje atmosférické destilaci, ze které se získá benzín, petrolej a plynový olej. Následuje vakuová destilace s olejovými destiláty, po níž zůstávají nejtěžší olejové destiláty a asfalty. Z vhodných olejových destilátů, které se podrobí další rafinerii, se získávají transformátorové oleje. Transformátorové oleje stárnou, proto se jejich vlastnosti kontrolují. Kontrolou a ošetřováním lze zpomalit stárnutí oleje, zabránit jeho trvalému znehodnocování, a tak zamezit předčasnému vyřazení transformátoru z provozu. Při kontrole transformátorových olejů se hlavně sledují čísla kyselosti a elektrické pevnosti. Ošetřování, neboli regeneraci oleje lze provádět za provozu nebo mimo provoz. [3, 4]

Kondenzátorové oleje jsou rafinované minerální oleje s nízkým bodem tuhnutí. Jsou vyráběny z těch samých surovin jako transformátorové oleje. [3, 4]

1.3.2 Syntetické kapaliny

Syntetické kapaliny můžeme rozdělit do pěti základních skupin. Mezi tyto skupiny se řadí:

- a) připravené polymerací nenasycených uhlovodíků z krakových plynů
- b) chlorované uhlovodíky
- c) fluorované uhlovodíky
- d) organické étery
- e) silikonové oleje

Nejznámějším polymerem nenasycených uhlovodíků je Oktol. Připravuje se polymerací izobutylenu a n-butylenu za použití AlCl_3 jako katalyzátoru. [3, 4]

Z chlorovaných uhlovodíků se dříve vyráběly chlorované parafíny. Později se však ukázalo, že nevyhovují, protože jsou nestabilní. Proto se přešlo k chlorovaným aromatickým sloučeninám, ze kterých vyhovují například trichlorbenzen, pentachlordifenyl, pentachlordifenyloxid a další. V transformátorech se jako nehořlavá náplň nejlépe osvědčil chlorovaný definyl spolu v kombinaci s trichlorbenzenem. Obvyklý poměr těchto dvou složek je 75 % chlorovaného definylu a 25 % trichlorbenzenu. [3, 4]

Mezi další syntetické kapaliny patří fluorované uhlovodíky. Tyto kapaliny mají specifické vlastnosti, jako například výborné elektrické vlastnosti a velkou měrnou hmotnost a nemají prakticky bod vzplanutí. Mezi fluorované uhlovodíky patří např. sloučeniny $(\text{C}_2\text{F}_5)_3\text{N}$ a $(\text{C}_4\text{F}_9)_2\text{O}$. [3, 4]

Organické étery mají určité významné vlastnosti, díky kterým jsou předurčeny pro používání v elektrotechnických zařízeních. Mezi ně patří výborné elektrické vlastnosti, velká permitivita a nízký bod tuhnutí. Jsou to např. amiloleát, benzylbenzonát, butylborát atd.. [3, 4]

Poslední skupinu syntetických kapalin uzavírají tekuté silikonové polymery, též označované jako silikonové oleje. Tyto oleje se hojně využívají v kondenzátorech a transformátorech a některých radiotechnických přístrojích. Mohou pracovat při nízkých i vysokých teplotách, řádově od -70 do $+150$ °C. Mezi představitele této skupiny olejů patří například polymetylfenylsiloxany a polymetylsiloxany. Je nutno dodat, že syntetické tekutiny jsou velmi drahé, proto je jejich rozšiřování velmi pomalé. Z tohoto důvodu nemohou konkurovat olejům vyrobených z ropy. [3, 4]

1.3.3 Přírodní estery

V praxi se hodně využívají minerální oleje, které jsou ale z ropy. Nejsou rozložitelné a jsou velice hořlavé. Proto se hledají další kapaliny, které by byly rozložitelné, šetrné k životnímu prostředí a navíc by zaručovaly dostatečné elektrické a fyzikální vlastnosti. Mezi tyto hledané kapaliny lze zařadit přírodní estery. Jsou úplně rozložitelné a jejich cena v porovnání se syntetickými kapalinami není tak vysoká. Nevýhodou těchto olejů je zrychlené stárnutí oproti olejům minerálním a syntetickým. Přírodní estery se skládají z glycerinu a esterů nenasycených a nasycených mastných kyselin. [3]

1.4 Plynné izolanty

V elektrotechnice se plyny nevyužívají jenom jako izolanty, ale mohou být použity i pro vedení elektrického proudu, pro získání světla ve výbojkách, nebo pro odvádění tepla z různých elektrotechnických zařízení. Dále se dají použít jako ochranná atmosféra při zpracování kovů a pro zmenšení odpařování žhavých drátů. Plynné látky nemají stálý tvar ani objem, jako je to u pevných a kapalných látek. Plyn se snaží zaujmout co největší prostor. Když do prostoru vpustíme dva různé plyny, dojde k jejich smísení. Mezi používané plyny v elektrotechnice se řadí vzduch, vzácné plyny, normální plyny, plynné sloučeniny a páry. [3, 4]

Nejčastěji používaným plynem je vzduch, což je směs různých plynů. Je v něm zastoupen dusík (78 %), kyslík (21 %), argon (cca 1 %) a vzácné plyny. Za normálních podmínek má vzduch měrný odpor $\rho 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$, činitel dielektrických ztrát $\text{tg } \delta 10^{-6}$. [3, 4]

1.4.1 Vzácné plyny

Vzácné plyny, také známé jako plyny netečné, se vyznačují tím, že ani v ionizovaném stavu netvoří sloučeniny, ani se nespojují s jinými prvky. K jejich získávání dochází při výrobě kapalného vzduchu. Jelikož má hélium a neon nízký bod varu, zůstává jejich směs jako nezkondenzovaný zbytek při této výrobě. Hélium lze také získat ze zdrojů přírodních plynů oddělením od jiných plynů difúzí přes tenkostěnné kapiláry křemenného skla. [3, 4]

Hélium se samostatně používá poměrně málo. V zářivkách vyžaduje vyšší napětí. Nejčastěji se vyskytuje ve směsi s neónem jako náplň výbojek. [4]

Neón se používá výhradně ve směsi s jinými plyny. S argonem se využívá jako náplň výbojek s modrým světlem, ve směsi s héliem ve výbojkách s červeným světlem. [3, 4]

Téměř čistý argon se využívá pro náplň zářivek s bíle svítícími luminofory. Pro běžně používané žárovky se používá technicky čistý argon, jehož čistota se pohybuje od 85 do 98%. [3, 4]

Xenon našel uplatnění v lampách s vysokým tlakem s wolframovými elektrodami a v bleskových lampách. [4]

1.4.2 Normální plyny

Mezi normální plyny lze zařadit vodík, dusík, kyslík a kysličník uhličitý.

Vodík má ze všech plynů nejmenší elektrickou pevnost, oproti tomu má nejlepší tepelné vlastnosti. Jeho měrná tepelná vodivost je téměř sedmkrát větší než u vzduchu. Ve vodíkovém prostředí nedochází k oxidaci a pohybující se části ve vodíkovém prostředí nepodléhají takovým třecím silám, protože měrná hmotnost vodíku je oproti vzduchu čtrnáctkrát menší. Vodík lze získat z odpadových plynů při syntéze benzínu, nebo elektrolýzou vody. Pečlivě čištěný vodík se používá ve vakuové technice jako náplň elektronek nebo výbojek. Lze ho použít jako chladící médium u velkých strojů. Při tomto využití musí být vodík o čistotě 99 %. Při smísení vodíku se vzduchem vzniká třaskavý plyn. [3, 4]

Dusík lze vyrobit z kapalného vzduchu. Používá se pro výplň prostoru nad olejovými náplněmi transformátorů, kde zabraňuje oxidaci. Dále se dá využít při plnění vysokonapěťových kondenzátorů i kabelů. Lze ho použít i ve vakuové technice jako náplň žárovek nebo se přidává k vzácným plynům, kde zvětšuje jejich elektrickou pevnost. [3, 4]

Dalším plynem, který patří do takzvaných normálních plynů, je kyslík. Lze ho získat buď z kapalného vzduchu, takto získaný kyslík je velice čistý, nebo elektrolyticky. Elektrolyticky vyrobený kyslík obsahuje větší množství vodíku než kyslík z kapalného vzduchu. Kyslík se kromě svařovací techniky používá pro povrchovou oxidaci, např. stříbrných ploch pro fotobuňky, a při výrobě vakuových elektronek. [4]

Nejčistší kysličník uhličitý se získá ze suchého ledu, protože kyslík při tuhnutí CO_2 ještě nekondenzuje. Při vyšších tlacích se používá jako dielektrikum normálních kondenzátorů a pro plnění olejových transformátorů odesílaných bez oleje. Používá se i jako náplň zářivek s bílým světlem a také jako indikátorový plyn pro zjišťování hrubších netěsností. [4]

1.4.3 Plynné sloučeniny

Jedná se především o sloučeniny uhlíku a chloru nebo fluoru, popřípadě síry a fluoru. Sloučeniny se vyznačují větší elektrickou pevností než samotné plyny. V praxi se využívají plyny, které nejsou jedovaté nebo korozivní. Nejvíce se uplatňují sloučeniny CF_2Cl_2 pod názvem Frigen, nebo fluorid sírový SF_6 . [4]

Frigen je nekorozivní bezbarvý plyn, který není jedovatý. Je 4krát těžší než vzduch a zůstává stabilní do teploty $750\text{ }^\circ\text{C}$. Rozpouští tuky, vosky a kaučuk. [4]

Fluorid sírový (SF_6) je plyn 5krát těžší než vzduch. Je stabilní a nehořlavý do 200 °C. Při normálním tlaku má dvojnásobnou elektrickou pevnost než vzduch, při tlaku dvou atmosfér má elektrickou pevnost stejnou jako transformátorový olej. Díky těmto vlastnostem se využívá jako plynný izolant pro náplně transformátorů. [4]

1.4.4 Páry

Páry jsou plynné fáze látek pod jejich kritickou teplotou. Přehřátou páru lze považovat za plyn. V dnešní době se nejvíce používají páry rtuti a sodíku, někdy se používá pára kadmia a zinku.

Nejvíce používané jsou rtuťové páry. Tyto páry našly uplatnění u rtuťových usměřovačů, u kterých elektrický oblouk ve rtuťové páře ve vakuu propouští střídavý proud jen jedním směrem. [3, 4]

2 Elektrická vodivost izolačních materiálů

Z elektroizolačního pohledu potřebujeme, aby izolační materiály byly bez volných nosičů elektrického náboje, znečištění a příměsí. Avšak každý reálný izolant obsahuje určité množství volných nosičů elektrického náboje. S tím musí být počítáno při výběru vhodného izolačního materiálu pro konkrétní reálné použití. K hodnocení materiálů z hlediska elektrické vodivosti se v praxi využívá hodnot měrného elektrického odporu (rezistivity) ρ [$\Omega \cdot m$] a měrné elektrické vodivosti (konduktivity) γ [$S \cdot m^{-1}$]. Měrný, na jednotku objemu přepočítaný odpor nebo vodivost, je vhodný z hlediska porovnávání materiálů mezi sebou. Rezistivita a konduktivita mají mezi sebou nelineární vztah. Tento vztah vypadá takto:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad 5$$

Číselně tento vztah můžeme vyjádřit tak, že hodnota rezistivity je rovna odporu krychle o hraně 1 m daného materiálu, při protékání proudu mezi jejími dvěma protilehlými stěnami. Pro ploché vzorky, při předpokladu homogenního pole, musíme vyjádřit měrný elektrický odpor. Měrný elektrický odpor vypočteme:

$$\rho = R \cdot \left(\frac{S}{h}\right) \quad 6$$

kde S je plocha elektrod [m^2], h znázorňuje tloušťku vzorku [m] a R je hodnota změřeného tzv. izolačního elektrického odporu [Ω]. Izolační odpor materiálu je hodnota okamžitého odporu, vypočítaná pomocí přiloženého napětí a procházejícího proudu:

$$R = \frac{U}{I} \quad 7$$

Pomocí izolačního odporu nelze materiály porovnávat, zatímco pomocí hodnot rezistivity je to možné. [1, 2]

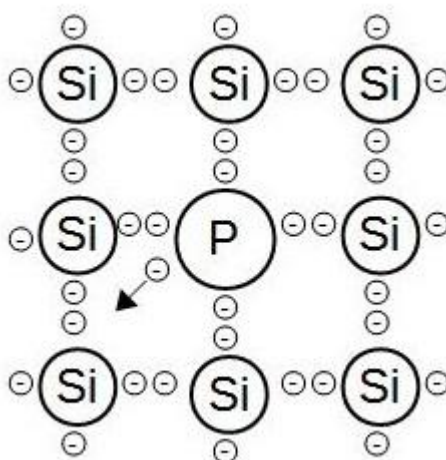
Dalším pohledem na elektrickou vodivost je rozdělení podle typu nosičů elektrického náboje. Jedná se o elektrickou vodivost elektronovou, děrovou, protonovou, iontovou a elektroforetickou. V prvních případech se elektrický náboj přenáší prostřednictvím elementárních částic nebo iontů, v případě elektroforetické vodivosti se elektrický náboj

přenáší většími skupinami částic. Za normálních podmínek se mezi nejčastější volné nosiče elektrického náboje řadí vlastní ionty, popřípadě ionty příměsí a nečistot. [1, 2]

Ke vzniku a pohybu volných nosičů náboje v látkách velmi záleží na skupenství látky. Jak se mění skupenství, tak se mění i vzdálenost jednotlivých částic látky, které na sebe mohou působit. [1]

2.1 Elektrická vodivost pevných izolantů

Při normálních podmínkách, to znamená ve slabých elektrických polích a normálních teplotách, je konduktivita pevných izolantů velmi malá. Pevné izolanty mohou mít dva typy elektrické vodivosti, z nichž jedna převládá. Vodivost může být buď elektronová, nebo iontová. V reálném použití převládá iontová vodivost, elektronová vodivost se vyskytuje až při zvýšených hodnotách intenzity elektrického pole 10^1 - 10^2 kV.mm⁻¹. Při poruše se zvyšuje koncentrace slabě vázaných iontů, která má za následek zvětšování elektrické vodivosti izolantů. Podle mechanismu vzniků iontů, které se zúčastní elektrické vodivosti, rozdělujeme pevné izolační materiály na iontové krystalické látky, anorganické amorfnní látky a na organické amorfnní látky. [1, 2]



Obr. 1: Elektronová vodivost (překresleno z: [6])

2.1.1 Iontové krystalické látky

Základem iontových krystalických látek jsou kladné a záporné ionty, které se nacházejí v uzlech mřížky. V ideální mřížce je pohyb iontů nemožný. K elektrické vodivosti těchto látek je zapotřebí vzájemné výměně kladných a záporných iontů. Takto vzniklá elektrická vodivost je velmi energeticky náročná. V reálných krystalech lze naměřit určitou měřitelnou elektrickou vodivost, což dokazuje existenci ještě jiné možnosti

pohybu iontů krystalem. Jednou z možností je, že ionty získají dostatečnou energii k opuštění svého místa v uzlu mřížky při svých tepelných kmitech. Při této možnosti přeskočí ionty do tzv. intersticiální polohy (meziuzlová poloha) a tím vznikne vždy jedna vakance (volné místo ve struktuře). Tato porucha se nazývá Frenkelova porucha. Aby iont přešel do intersticiální polohy, potřebuje energii přibližně 1 - 2 eV. Iont, který se dostal do intersticiální polohy, kmitá a tím získává díky tepelným fluktuacím dostatečnou energii k přemístění se do jiného mezimřížkového prostoru. K přechodu z jedné intersticiální polohy do druhé potřebuje iont asi 0,15 eV. Pohyblivost těchto intersticiálních iontů přispívá k elektrické vodivosti krystalu látky. Další porucha, která se podílí na elektrické vodivosti krystalů, je tzv. Schottkyho porucha. Dochází k ní, když se v krystalové mřížce nachází stejný počet volných míst po kladných a záporných iontech. V tomto případě způsobuje elektrickou vodivost pohyb vakancí, to je přechod sousedních iontů do blízkého volného místa. Energie potřebná k přechodu vakancí je asi 0,4 eV. V krystalech se nacházejí i další poruchy struktury mřížky. Vznikají při tepelných a mechanických namáháních krystalu. [1]

2.1.2 Anorganické amorfní látky

Mezi tyto představitele patří hlavně různé druhy skel. Vlivem různých druhů skel se liší i jejich elektrická vodivost a to v rozsahu 10^{-3} - 10^{17} S.m⁻¹. Nejmenší elektrickou vodivost mají skla čistě křemičitá (SiO₂) a skla boritá (B₂O₃). V technických sklech se přidáním dalších oxidů upravují mechanické vlastnosti. Nejen že se upraví mechanické vlastnosti, ale dojde i ke změně elektrických vlastností. Elektrické vodivosti skel umožňují slabě vázané ionty, které se pohybují vlivem vnějšího elektrického pole. Stejně jako u krystalických izolantů může být elektrická vodivost anorganických amorfních látek závislá na intenzitě elektrického pole. [1]

2.1.3 Organické amorfní látky

Mezi organické amorfní látky můžeme zařadit syntetické makromolekulární látky. V praxi se nejvíce používají polymerní materiály, jako například polyetylen, polystyren, polytetrafluorethylen a další. Tyto materiály se vyznačují malou elektrickou vodivostí, která je menší než 10^{-17} S.m⁻¹. Předpokládá se, že elektrická vodivost v organických amorfních látkách má iontový charakter. Elektrická vodivost polymerů je silně závislá na čistotě a stupni polárnosti. V nepolárních makromolekulárních izolantech elektrickou vodivost způsobují nečistoty. V polárních makromolekulárních izolantech ji způsobují jednak nečistoty a také disociované molekuly vlastního izolantu. Elektrická vodivost

polymerních izolantů je citlivá na přítomnost vody. Přítomnost vody zhoršuje izolační vlastnosti materiálů. [1]

2.1.4 Povrchová vodivost pevných izolantů

Do této chvíle jsme brali elektrickou vodivost izolantu jako vnitřní vodivost, ale u pevných izolantů se kromě vnitřní vodivosti projevuje i povrchová elektrická vodivost. Měrnou povrchovou elektrickou vodivost lze zjistit pomocí tekoucího proudu na povrchu izolantu I_p a intenzity elektrického pole E vztahem:

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E} \quad 8$$

Povrchovou elektrickou vodivost můžeme hodnotit pomocí měrného povrchového elektrického odporu:

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{l_e}{d} \quad 9$$

kde hodnota R_p ukazuje povrchový elektrický odpor materiálu, který je naměřený mezi rovnoběžnými elektrodami, l_e je délka elektrod na povrchu a d je vzdálenost mezi elektrodami. Povrchovou elektrickou vodivost izolantů způsobují pohybující se volné nosiče elektrického náboje, které vznikají disociací molekul nečistot na povrchu izolantu. Disociace je velmi podporována adsorbovanou vlhkostí. Z toho je patrné, že povrchová vodivost izolantu souvisí s relativní vlhkostí okolí. Povrchovou vodivost určuje i intenzita adsorbování vlhkosti daného materiálu. Nejvýraznější je adsorbce u materiálů s iontovým charakterem vazeb, nejmenší je u nepolárních látek. [1]

2.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů

Kapaliny se přirozeně liší svým charakterem od plynných a pevných látek. Vznikají kondenzací plynů, nebo tavením pevné látky. Mezimolekulové vzdálenosti kapalin jsou úměrné rozměrům molekul, takže jejich vzájemné interakce jsou silnější než v plynech, ale slabší než v pevných látkách. Důsledkem toho vznikají nestabilní neustále se měnící uspořádání, tzv. klastry. Tyto klastry se mohou vzájemně posunovat, díky čemuž mohou kapaliny téci a zaujímat tvar podle nádob. [1, 2]

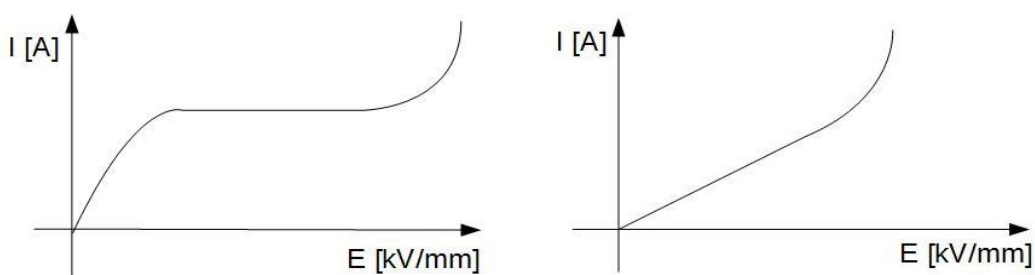
Elektrická vodivost kapalných izolanů závisí na složení, struktuře, množství příměsí a nečistot. Proto se pro studium vodivostních jevů v kapalných izolantech rozlišuje extrémně čistý kapalný izolant a tzv. technicky čisté kapaliny. [1, 2]

Extrémně čisté kapalně izolanty mají velmi nízkou konduktivitu ($\gamma=10^{-14}$ - 10^{-15} S.m⁻¹), která je způsobena volnými nosiči elektrického náboje. Ty mohou vzniknout čtyřmi způsoby:

- a) **ionizací** neutrálních molekul za působení ionizačního činidla, např. záření
- b) **disociací** molekul vlastní kapaliny
- c) **tepelnou excitací elektronů**
- d) **emisí elektronů** z katody v silných elektrických polích

Technicky čisté kapalně izolanty mají horší konduktivitu než extrémně čisté kapalně izolanty ($\gamma=10^{-11}$ - 10^{-12} S.m⁻¹), což je zapříčiněno zvýšenou koncentrací volných nosičů elektrického náboje. Tyto náboje jsou různého charakteru a závisí na druhu příměsí a velikosti přítomných částic. V technicky čistých kapalných izolantech rozlišujeme dva typy vodivosti, a to iontovou a elektroforetickou. [1]

V chování extrémně a technicky čistých kapalných izolanů jsou odlišnosti, které jsou velmi dobře poznat na voltampérové charakteristice. U charakteristiky extrémně čistých kapalných izolanů je vidět, že se tam vyskytuje oblast nasyceného proudu, u technicky čistých kapalin tato oblast chybí. [1]



Obr. 2: Voltampérové charakteristiky extrémně a technicky čistých kapalných izolanů
(překresleno z: [1])

2.2.1 Iontová elektrická vodivost kapalných izolantů

Iontovou elektrickou vodivost kapalných izolantů můžeme dělit na vlastní a nevlastní. Vlastní elektrická vodivost je zapříčiněna pohybem iontů, které vzniknou rozkladem molekul vlastního kapalného izolantu. Stupeň disociace je závislý na relativní permitivitě kapalného izolantu. Vyššího stupně disociace dosahují polární kapaliny před nepolárními. [1, 4]

Nevlastní elektrickou vodivost způsobují přítomné disociované příměsi. Stupeň této disociace příměsí je závislý na struktuře, koncentraci a relativní permitivitě rozpouštědla. Tato vodivost je ve všech technicky čistých kapalných izolantech. [1, 4]

Při úvahách o konduktivitě kapalných izolantů musíme brát v potaz jejich strukturu. Uplatňují se zde interakce molekul, které jsou silnější než u plynů, ale slabší než u pevných látek. Díky tomu vznikají již zmíněné nadmolekulární struktury - klastry. Vazby mezi molekulami se neustále přerušují vlivem tepelného pohybu částic, který má obecně dvě složky - rotační a translační, aby mohly vzniknout na jiném místě mezi jinými molekulami. Aby se mohl uplatnit translační pohyb, musí mít molekula v blízkosti místo, do kterého by mohla přeskočit. Aby mohla molekula přeskočit, musí získat dostatečnou energii k překonání energetické bariéry mezi oběma místy. [1]

2.2.2 Elektroforetická vodivost

Další vodivostí kapalných izolantů je vodivost elektroforetická, která se výrazně neliší od iontové vodivosti. Elektroforetickou vodivost lze najít v koloidních systémech, které se vyznačují tím, že jsou tvořeny dvěma fázemi. První fáze, nazývaná také disperzní fáze, vystupuje ve formě jemných částic, což mohou být např. drobné pevné částice, kapky atd.. První fáze je rozptýlena v druhé fázi, kterou nazýváme disperzní prostředí. V kapalných izolantech se vyskytují emulze a suspenze. Emulze je forma, kdy jsou obě fáze kapalné, suspenze je forma, kdy je disperzní fáze tvořena pevnými částicemi a disperzní prostředí je kapalné. Tyto látky jsou stabilní, protože na povrchu částic, které tvoří disperzní fázi, se nachází elektrické náboje, které díky silovým účinkům obě fáze neoddělí. Každá koloidní částice má vůči disperznímu prostředí určitý potenciál, který se nazývá elektrokinetický potenciál a dosahuje hodnot podle druhu látek od 0,05 do 0,07 V. [1]

2.3 Elektrická vodivost plynných izolantů

Plyny jsou zvláště ve slabých elektrických polích a při nízkých teplotách velmi dobrými izolanty. Obsahují totiž převážně neutrální molekuly a jejich vzdálenosti od sebe jsou řádově stokrát větší než jejich vlastní rozměry. Výborné izolační schopnosti plynů jsou způsobené malou koncentrací volných nosičů elektrického náboje. Tyto volné nosiče náboje mohou vzniknout při působení ionizačních činitelů elektrického původu, radioaktivního nebo kosmického záření. Vlivem těchto činitelů na neutrální atom, dochází k uvolnění jednoho či více elektronů a tím vznikají volné nosiče náboje. Jedná se o tzv. ionizaci plynu. K tomuto jevu dochází, když atom pohltí dostatečné množství tzv. ionizační energie. Rozeznáváme tři druhy mechanismu, jak může dojít k ionizaci:

- a) **nárazová ionizace** - jedná se o vzájemnou interakci silových polí při blízkém průletu a vychýlení dráhy neutrální částice a elektronu nebo iontu, který vlivem působení elektrického pole, nebo vlivem vysoké teploty, získal dostatečnou kinetickou energii. Pro ionizaci neutrální částice musí být splněn vztah:

$$W_i \geq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad 10$$

kde W_i je ionizační energie, m hmotnost ionizující částice a v je její rychlost. Nárazovou ionizaci mohou vyvolat i rychlé částice α a β . Hlavní ionizační činitel v atmosférickém vzduchu je plyn radon, který se rozpadá a v jeho okolí dochází k procesům nárazové ionizace. [1, 2]

- b) **fotoionizace** - probíhá pohlcením fotonu neutrálním atomem. K fotoionizaci dochází díky gama, Rentgenovo a kosmickému záření. Aby došlo k fotoionizaci, musí být splněna podmínka:

$$W_i \geq h \cdot \nu \quad 11$$

kde W_i je ionizační energie, h je Planckova konstanta a ν je frekvence záření. [1, 2]

- c) **povrchová ionizace** - u tohoto typu ionizace se elektrony uvolňují z povrchu elektrod. Energií, která je potřebná pro výstupní práci, je tepelná energie, nebo různé druhy krátkovlnného záření, které působí na povrch elektrod. Tato

vodivost není charakteristickou pro daný plyn mezi elektrodami, ale závisí na použitém kovu elektrod. [1]

Elektrickou vodivost plynů můžeme rozdělit na nesamostatnou a samostatnou. O nesamostatnou elektrickou vodivost se jedná v případě slabých elektrických polí, kdy se volné nosiče elektrického náboje vytváří pouze díky působení vnějších ionizačních činitelů. O samostatnou elektrickou vodivost plynů jde tehdy, kdy se plyn nachází v silných elektrických polích a kde dochází k nárazové ionizaci vlivem dostatečně urychlených částic působícím polem. [1]

Při ionizaci dochází v plynu ke změně koncentrace volných nosičů náboje. Tuto změnu popisuje tzv. koeficient generace g , který je definován jako počet vznikajících párů volných nosičů náboje v jednotce objemu za jednotku času. Vztah pro výpočet nově vzniklých párů volných nosičů náboje potom vypadá:

$$dN = g \cdot dV \cdot dt \quad 12$$

Pro pochopení tohoto vztahu se uvádí příklad, kdy za normálních podmínek ve vzduchu (20 °C, 100 kPa) je koeficient generace $g = 4 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, což znamená, že za jednu sekundu vznikne v jednom m^3 $4 \cdot 10^6$ elektronů a kladných iontů. [1]

Při ionizaci kromě vzniku volných nosičů nábojů, dochází také k jejich zániku. Jsou dvě možnosti, jak mohou volné nosiče náboje zaniknout. Jedním je neutralizace na elektrodách, druhým je rekombinace. [1]

Pro neutralizaci platí, že volné nosiče náboje dopadnou na elektrodu s opačnou polaritou, které odevzdají svůj náboj nebo přijmou náboj z elektrody, a vracejí se zpět mezi elektrody jako neutrální atomy. Tyto elektrické náboje, které dokážou procházet mezi rozhraním dielektrikum-elektroda, vytváří elektrický proud, který je možné zjistit ve vnějším obvodu. [1]

K rekombinaci dochází mezi dvěma částicemi s opačnou polaritou, které se srazí a dojde k vytvoření neutrálního atomu nebo molekuly. Pravděpodobnost, že částice rekombinují, je tím větší, čím déle jsou v bezprostřední blízkosti, tzv. čím menší je jejich relativní rychlost. V termodynamické rovnováze je větší pravděpodobnost, že se setkáme s iontovou rekombinací než s elektronovou, protože rychlost volných elektronů v termodynamické rovnováze je větší než rychlost kladných iontů. Elektrony zpravidla rekombinují nepřímo. To znamená, že se zachytí na neutrálních atomech a vytvoří tím

záporné ionty. Proces rekombinace nastává v tu samou chvíli jako proces ionizace a je přímo úměrný koncentraci iontových párů v plynu. Konstantu úměrnosti nazýváme koeficient rekombinace r a v případě iontové rekombinace ho lze vyjádřit jako počet rekombinovaných kladných a záporných iontů v jednotce objemu za jednotku času:

$$R = r \cdot n_+ \cdot n_- \quad 13$$

kde R je počet rekombinovaných iontů v jednotce objemu za jednotku času, r je koeficient rekombinace a n_+ a n_- jsou koncentrace kladných(záporných) iontů. [1, 2]

3 Aspekty ovlivňující elektrickou vodivost izolantů

Popsali jsme si elektrickou vodivost izolantů v jednotlivých skupenství, ale takto to nemusí být vždy. V dalším tématu popíšeme vlivy, které mohou změnit elektrickou vodivost. Vlastnosti izolantu nejsou dány pouze složením a strukturou izolantů, ale závisí i na vnějších vlivech. Při těchto vlivech může docházet k vratným, přechodným nebo i k trvalým jevům. [4, 7]

3.1 Vliv prostředí a podnebí

U elektrických zařízení se musí určovat, v jakém prostoru, v jakém prostředí a v jakém podnebí budou pracovat, aby se mohl vhodně navrhnout izolační systém. Rozdělení prostor a prostředí určují normy. Prostředím se myslí hmota, která obklopuje převážnou část zařízení, stýká se s ním nebo je nebezpečně blízko. Elektrická zařízení jsou nejčastěji provozována v plynném prostředí. Prostory, v kterých je elektrické zařízení provozováno, mohou být např. obyčejné, horké, vlhké, prašné, se zvýšeným nebezpečím úrazu, s nebezpečím ohně a venkovní prostory. Jestliže zařízení pracuje ve ztížených klimatických podmínkách, zavádí se podle klimatotechnologických norem pojem podnebí, které nám určuje průměrný stav atmosféry na určitém místě zemského povrchu. Podnebí, ve kterém zařízení pracuje, je ovlivňováno řadou podnebních činitelů. Významné jsou vlivy na použité materiály, které vyvolávají jejich chemické a fyzikální změny, z čehož může vyústit špatná činnost zařízení nebo zhoršení stavu izolace. Vlivy podnebí se mohou projevit námrazou, orosením, plísněmi apod.. [4]

Podnebí se od místa k místu mění, proto se zavedlo rozdělení zemského povrchu na několik oblastí se stejnými vlastnostmi podnebí. Tyto oblasti jsou :

- a) mírné podnebí
- b) suché tropické podnebí
- c) vlhké tropické podnebí
- d) subtropické podnebí
- e) studené podnebí

V mírném podnebí jsou klimatické faktory se střední intenzitou a nenabývají extrémních hodnot. To neplatí u suchých tropických podnebí, které jsou známy vysokou intenzitou záření, vysokými teplotami (až 55 °C) a nízkou vlhkostí vzduchu. V tomto podnebí jsou v průběhu dne velké změny teploty, které jsou od 55 °C v poledních

hodinách, až k hodnotám blízkým bodu mrazu v noci. S teplem a větrem jsou spojené další vlivy, které způsobují zhoršení stavu izolantů, jako třeba prach a písek, částičky, které se ve zvýšené míře usazují na povrchu izolantu, což má za následek zhoršení ochlazování stroje a může docházet k přehřívání. Hlavními vlivy, které působí na elektrotechnická zařízení ve vlhkém tropickém prostředí, jsou dlouhotrvající vlhkost a vysoké teploty. Velké teplo a vlhkost jsou základními podmínkami pro život mikroorganismů, jež jsou velmi nebezpečné pro izolace, které nejsou proti nim chráněny. Pro subtropické podnebí je charakteristické časté střídání velké vlhkosti a vysoké teploty vzduchu. Ve studeném podnebí je charakteristická nízká teplota vzduchu. [7]

V oblasti suchých tropů, kde se setkáváme s intenzivním slunečním zářením, může docházet k poruše izolantů vlivem účinku krátkovlnné složky a také kvůli oteplení, které je způsobené dlouhovlnnou složkou slunečního záření. Oteplení je závislé na barvě a drsnosti povrchu. Teplota povrchu může překročit i hranici 100 °C. Při vysokých okolních teplotách se zařízení hůře chladí, proto je nutné omezit výkon stroje, nebo přidat chlazení, aby se nepřekročily maximální přípustné teploty pro použité izolanty. Vysoké teploty mohou způsobit rychlé tepelné stárnutí izolantu a zhoršení mechanických vlastností. Velké nebezpečí může být způsobeno i prudkou velkou změnou teploty. Např. při tropickém dešti může teplota předmětu rychle poklesnout až o 80 °C, což může způsobit např. popraskání porcelánových izolátorů. [7]

3.2 Vliv teploty

Izolanty musí být schopny plnit svou funkci v často velkých rozmezích teplot. Tyto teploty mohou být způsobené okolním prostředím, ale teplotu izolantu můžou zvýšit i ztráty elektrického zařízení, kterého je izolace součástí. Je proto velmi důležité vybírat vhodné materiály, které mají vyhovující vlastnosti v celém rozsahu teplot. [7]

Tepelná odolnost izolantů není důležitá pouze z technického hlediska, ale i z hlediska ekonomického. Tepelná odolnost totiž omezuje maximální teplotu celého zařízení a tím omezuje i využití celého zařízení. Maximální teplota, kterou můžeme připustit bez ohrožení funkce izolace, se označuje jako krátkodobá tepelná odolnost, na rozdíl od trvalé tepelné odolnosti, která se označuje jako odolnost vůči tepelnému stárnutí. Při výběru vhodného materiálu je rozhodující nižší hodnota z obou dvou, proto nelze při navrhování izolace přehlížet jen k jedné z nich. [7]

3.3 Vliv světla

Světlo je elektromagnetické záření, jehož frekvenční rozsah obsahuje složky od infračerveného záření, přes viditelné světlo až do ultrafialového záření. Energie záření je závislá na frekvenci, proto ultrafialové záření má největší účinky. Hlavní zdrojem ultrafialového záření je sluneční záření a izolanty, které jsou vystaveny přímému slunečnímu záření, jsou podrobeny největšímu světelnému stárnutí. U izolantů, na které nedopadá přímé slunečné záření, je vliv světelného stárnutí prakticky zanedbatelný. Izolant neabsorbuje všechny frekvence záření, ale pouze ty frekvence shodné s frekvencemi kmitavých skupin, které se nacházejí ve struktuře izolantu. Energie, kterou izolant pohltí, vyvolává fotochemické reakce, které mohou probíhat do té doby, než ozáření přestane. Světlo může vyvolat i účinky tepelného stárnutí. Při současném působení světla a tepla je výsledek účinku mnohem větší než pouhý součet obou účinků působící odděleně. Abychom ochránili izolanty před účinky záření, přidáváme do izolačních směsí stabilizátory, které jsou schopny absorbovat záření. Výběr vhodných stabilizátorů závisí na tom, aby nezhoršovaly elektrické vlastnosti. Musíme také počítat s tím, že některé inhibitory tepelného stárnutí mohou urychlit světelné stárnutí. [7]

3.4 Vliv vlhkosti

Vlhkost a voda mají na elektrické vlastnosti negativní vliv. U většiny pevných i kapalných izolantů se elektrické vlastnosti méně či více zhoršují. To je způsobeno vysokou permitivitou vody a vysokým stupněm disociace, který způsobuje vysokou vodivost vody. Hlavním ze zdrojů vlhkosti je atmosféra. Ve vzduchu je za normálních podmínek vždy určité množství vodních par. Absolutní vlhkost vzduchu je hmota vody v podobě páry v jednotce objemu. Jednotkou absolutní vlhkosti je g/m^3 . Absolutní vlhkost není rozhodující z hlediska působení vlhkosti na pevné a kapalné izolanty, ale rozhodující je tlak vodních par. Absolutní vlhkost není nekonečná, je omezená stavem, kdy se dosáhne nasycení vodních par. Vlhkost vzduchu se nejčastěji charakterizuje relativní vlhkostí, která je udávána v procentech. Relativní vlhkost je poměr tlaku par ve vzduchu k tlaku nasycených par za stejné teploty, nebo absolutní vlhkost vzduchu k absolutní vlhkosti vzduchu nasyceného vodními parami při stejné teplotě. Jestliže se v prostoru, kde je stálá absolutní vlhkost, zvětšujeme teplotu, relativní vlhkost klesá. V opačném případě, kdy se snižuje teplota, relativní vlhkost stoupá až ke 100 %. Při dalším snižování teploty část vodních par kondenzuje. [7]

Při nízké relativní vlhkosti vzduchu se na povrchu pevného izolantu adsorbuje vrstva vody, jejíž tloušťka se zvětšuje s relativní vlhkostí vzduchu. Adsorbování vrstvy vody má za následek snížení povrchového odporu izolantu. Adsorpce vody nemusí probíhat pouze na povrchu materiálu. Pokud je materiál např. pórovitý, vláknitý atd., adsorpce probíhá i v pórech a na povrchu vláken. V tomto případě se zhorší povrchový odpor i vnitřní odpor izolantu. [7]

Mezi nejlepší materiály, které jsou odolné proti vodě a vlhkosti, patří anorganické materiály, např. nepórovitý glazovaný porcelán, nealkalické sklo a slída. Z organických izolantů do této skupiny patří např. parafín, polyetylén a polystyrén. Na druhé straně jsou materiály, které nejsou tak odolné vůči vodě a vlhkosti a kvůli tomu se jim výrazně zhoršují elektroizolační vlastnosti. Mezi ně lze zařadit pórovité neglazované keramické izolanty, azbest, celulózu, dřevo, papír, lepenku a tkaninu. V plastických hmotách jsou to hlavně přísady, které ovlivňují chování plastických hmot ve vlhku. V lisovacích hmotách se například setkáme s dřevěnou moučkou, která při navlhnutí zvětší svůj objem a zhorší tím trvale elektrickou izolaci. [7]

4 Diagnostický systém

Na elektrické zařízení lze pohlížet taky jako na sériový spolehlivostní řetězec, v kterém výpadek jednoho článku znamená konec funkce celku. Abychom těmto věcem předešli, zkoumáme stav zařízení a zaměřujeme se na nejcitlivější místo. Tím je u většiny izolační systém. Izolanty patří do oblasti tzv. materiálového inženýrství. To zajišťuje potřebné prvky, jako např. výběr vhodného materiálu, popřípadě modifikaci látek, aby byly schopny plnit určitou specifickou funkci. [1, 8]

4.1 Základní aspekty diagnostiky izolanů

Zařízení které diagnostikujeme, pracuje v bezporuchovém stavu, když je schopno plnit všechny své funkce v plném rozsahu. V opačném případě, když neplní požadované funkce, říkáme že je ve stavu poruchovém. Pokud funkce plní jen částečně, jedná se o stav provozuschopný. Vliv na tyto stavy mívají i podmínky. Podmínky, ve kterých je objekt provozován, se považují za normální. Při této podmínce je respektován návod k obsluze a jeho údržbě. Při poruše v normálních podmínkách se lze říci, že porucha nastala jen z vnitřních příčin. Opakem normálních podmínek jsou nenormální podmínky. Do těch lze zařadit vnější vlivy, jako např. nesprávnou obsluhu zařízení, špatnou údržbu nebo jiné vnější podmínky. [8]

Diagnostika základních vlastností je prioritním cílem všech, kteří se podílejí na přípravě a výrobě elektrický zařízení. Informace o izolantech mají význam na všech úrovních od vzniku až po výrobu elektrických zařízení, v úzké návaznosti na technologie. Proto se v elektrotechnice bavíme o elektrotechnologické diagnostice. Ta objekt diagnostikuje pomocí dvou přístupů, fenomenologickým a strukturálním. Při fenomenologickém přístupu se pozornost upíná pouze na reakce diagnostického objektu na vstupní signály. Při strukturálním se pozornost věnuje dějům ve struktuře. Tento přístup dává vydatnější informace a jeho šetření mívají menší rozptyl hodnot. Jsou ale nutné lepší a nákladnější aparatury a speciálně vyškolenou obsluhu. Fenomenologický přístup je jednodušší, méně nákladný, rozptyly jsou větší a tento přístup je snazší pro obsluhu. [1, 8]

Dalším aspektem při diagnostice je problém destruktivnosti a nedestruktivnosti zkoušek. Destruktivní zkouška má velkou výpovědischopnost, ale je při ní veliká spotřeba materiálu, protože dochází k jeho znehodnocení. Destruktivní zkouška je ekonomicky náročnější. Nedestruktivní zkoušky je možné opakovat, protože nedochází k

znehodnocování materiálu. Při diagnostice izolantů se využívají dva postupy, off-line a on-line. Off-line postup znamená, že je zkoušený objekt ve zkušebním režimu, nepůsobí na něj žádné pracovní zatížení. Při on-line postupu se je zkoušený objekt v plném pracovním režimu. V oblasti izolantů se tento postup moc nevyužívá. Abychom elektrické zařízení správně diagnostikovali, tak nesmíme zapomínat na objektivitu diagnostiky. Aby jsme byli objektivní, musíme objekt zkoumat z více pohledů, více metodami. Proto diagnostické šetření má několik kroků:

- a) výběr vyšetřovaných vlastností
- b) stanovení diagnostického systému - určení metod
- c) stanovení a příprava zkušebních vzorků
- d) vlastní diagnostické šetření - měření ověřovaných vlastností
- e) vyhodnocení - zpracování získaných výsledků

Musíme vždy použít takové metody, z kterých získáme vydatné, úplné a všestranné informace. [1, 8]

4.2 Absorpční a resorpční charakteristiky

Velmi cenné informace o stavu izolantů získáváme z absorpčních a resorpčních charakteristik. Z těchto charakteristik lze určit izolační odpor R_X , vnitřní (ρ_V) a povrchovou (ρ_P) rezistivitu, polarizační indexy p_{i1} a p_{i10} a mnoho dalších parametrů. Abychom správně získali informace, musíme si definovat základní pojmy:

- a) Izolační odpor - je odpor materiálu mezi dvěma elektrodami, který se spočte jako poměr stejnosměrného napětí na elektrodách a celkový proud mezi nimi. Závisí na vnitřním a povrchovém odporu materiálu.
- b) Vnitřní odpor - je to poměr stejnosměrného napětí vůči ustálenému proudu mezi dvěma protilehlými elektrodami, vyjímaje proud na povrchu tělesa a se zanedbáním polarizačních jevů.
- c) Vnitřní rezistivita - je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř elektroizolačního materiálu. Jednotkou je $\Omega.m$.
- d) Povrchový odpor - poměr mezi stejnosměrným napětím a proudem který protéká mezi dvěma elektrodami. Měříme proud na povrchu tělesa, který ovlivňuje absorbovaná vlhkost a příměsi.

e) Povrchová rezistivita - je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty v povrchové vrstvě materiálu.

f) Zdroj napětí - musí být velmi stabilní. Při změně napětí musí být změna proudu zdroje zanedbatelná vůči měřenému proudu. Doporučené napěťové hladiny jsou 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10 000, 15 000 V. Pokud je měřený odpor závislý na polaritě, musí se to uvést. [1, 8]

4.3 Určení hodnot vnitřní rezistivity pro sledované materiály

Vlastní měření proběhlo na přístroji KEITHLEY 6517A a KEITHLEY 8009 dle normy ČSN IEC 93(346460) [9]. Před vlastním měřením, byly vzorky umístěny na jeden den do zkratovacích knížek, kde dochází k odebrání zbytkového náboje, aby nebylo ovlivněno měření. Hodnota napětí, při kterém se měřilo byla 500 V. Měřil se proud, který protéká daným materiálem, za jednotku času. Měřilo se od 1 do 6000 vteřin. Nejdříve se měřila absorpce a poté resorpce. Ta byla měřena pouze po 300 vteřin. Výpočet vnitřní rezistivity je dán vzorcem:

$$\rho = \frac{22,9 \cdot V}{t_c \cdot I} \quad 14$$

kde V je stejnosměrné napětí, v našem případě 500 V,

I je proud v ustáleném stavu [A],

t_c je tloušťka vzorku [cm].

Aby bylo měření objektivní, musí se měřit více vzorků. Při málo měření mohou být výsledky zkreslené, může se do výsledku zanést chyba měřících přístrojů nebo lidského faktoru. Vlastní měření proběhlo na pěti vzorcích pro dva různé izolační materiály.

Jedním z nich byl Relanex. Je to teplem tvrditelný izolační materiál, který je pružný při pokojových teplotách. Je vyroben z kalcinovaného slídového papíru a skleněné tkaniny, které jsou spojeny epoxy-novolakovou pryskyřicí. Má tloušťku od 0,12 – 0,21 mm s tolerancí $\pm 0,02$ mm. Plošná hmotnost Relanexu se pohybuje od $168 \pm 15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, až do $295 \pm 20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. [10]

Druhý materiál, který byl měřen, je Relastik. Je vyroben z kalcinovaného slídového papíru a polyethylenutereftalátu. Tyto dvě složky při sobě drží epoxy-novolaková pryskyřice. Relastik je 0,16 mm tlustý s tolerancí $\pm 0,01$ mm. Plošnou hmotnost má $240 \pm 12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. [11]

Průměrné tloušťky měřených vzorků, které jsou potřeba pro výpočet vnitřní rezistivity, jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 1: Tloušťky měřených vzorků

Materiál	relanex 1	relanex 2	relanex 3	relanex 4	relanex 5
Tloušťka [cm]	0,03922	0,03934	0,0396	0,03966	0,03696
Materiál	relastik 1	relastik 2	relastik 3	relastik 4	relastik 5
Tloušťka [cm]	0,02702	0,0285	0,02838	0,02758	0,026



Obr. 3: Měřicí pracoviště

4.4 Výsledky měření

Vlastní měření proběhlo na pěti vzorcích pro dva různé izolační materiály. U všech vzorků se měřila absorpce a resorpce. Výsledky měření lze vidět v tabulkách 1-4. Počítal se aritmetický průměr proudu pro jednotlivé časy. Aritmetický průměr se vypočte:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad 15$$

Dále byla spočtena směrodatná odchylka proudu. Směrodatná odchylka určuje rozptyl či odchýlení hodnot od průměru. Vypočte se:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 16$$

Poté se počítal variační koeficient. Tento koeficient je vhodný pro vzájemné porovnávání dvou nebo více předmětů s odlišnou úrovní hodnot. Variační koeficient nám ukazuje, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru. Vypočteme ho takto:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad 17$$

Tabulka 2: Absorpční hodnoty pro Relanex

Absorbce	Relanex 1	Relanex 2	Relanex 3	Relanex 4	Relanex 5	Průměr proudu [A]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
čas [s]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]			
0,000192	7,06E-10	6,26E-10	6,66E-10	6,85E-10	7,17E-10	6,80E-10	3,22E-11	0,047
15	9,27E-11	8,03E-11	8,79E-11	1,04E-10	1,14E-10	9,58E-11	1,20E-11	0,125
30	5,28E-11	4,55E-11	5,05E-11	6,14E-11	7,02E-11	5,61E-11	8,75E-12	0,156
45	3,81E-11	3,30E-11	3,67E-11	4,55E-11	5,35E-11	4,14E-11	7,31E-12	0,177
60	3,05E-11	2,64E-11	2,95E-11	3,67E-11	4,44E-11	3,35E-11	6,40E-12	0,191
120	1,80E-11	1,57E-11	1,80E-11	2,24E-11	2,88E-11	2,06E-11	4,64E-12	0,225
240	1,12E-11	9,67E-12	1,11E-11	1,41E-11	1,93E-11	1,31E-11	3,44E-12	0,263
300	9,54E-12	8,27E-12	9,63E-12	1,20E-11	1,71E-11	1,13E-11	3,15E-12	0,278
600	6,23E-12	5,37E-12	6,10E-12	7,76E-12	1,19E-11	7,48E-12	2,36E-12	0,315
900	4,65E-12	4,28E-12	4,83E-12	6,18E-12	9,92E-12	5,97E-12	2,08E-12	0,348
1200	4,24E-12	3,62E-12	4,16E-12	5,29E-12	8,73E-12	5,21E-12	1,84E-12	0,353
1500	3,53E-12	3,08E-12	3,80E-12	4,81E-12	7,95E-12	4,63E-12	1,75E-12	0,378
1800	3,38E-12	2,81E-12	3,40E-12	4,07E-12	7,46E-12	4,22E-12	1,66E-12	0,394
2100	2,95E-12	2,58E-12	3,11E-12	4,03E-12	6,92E-12	3,92E-12	1,58E-12	0,402
2400	2,81E-12	2,52E-12	2,94E-12	3,91E-12	6,56E-12	3,75E-12	1,48E-12	0,396
2700	2,75E-12	2,44E-12	2,82E-12	3,44E-12	6,32E-12	3,56E-12	1,42E-12	0,400
3000	2,55E-12	2,21E-12	2,79E-12	3,22E-12	6,06E-12	3,37E-12	1,38E-12	0,411
3300	2,43E-12	2,10E-12	2,52E-12	3,15E-12	5,80E-12	3,20E-12	1,34E-12	0,420
3600	2,39E-12	2,02E-12	2,51E-12	2,88E-12	5,62E-12	3,08E-12	1,30E-12	0,421
3900	2,20E-12	2,00E-12	2,27E-12	2,91E-12	5,51E-12	2,98E-12	1,30E-12	0,437
4200	2,17E-12	2,01E-12	2,23E-12	2,84E-12	5,47E-12	2,94E-12	1,30E-12	0,440
4500	2,09E-12	1,79E-12	2,14E-12	2,72E-12	5,19E-12	2,79E-12	1,24E-12	0,445
4800	1,97E-12	1,72E-12	2,12E-12	2,66E-12	5,21E-12	2,74E-12	1,27E-12	0,465
5100	2,06E-12	1,77E-12	2,20E-12	2,57E-12	5,08E-12	2,74E-12	1,20E-12	0,439
5400	1,89E-12	1,68E-12	2,08E-12	2,56E-12	5,11E-12	2,67E-12	1,26E-12	0,471
5700	1,91E-12	1,60E-12	1,95E-12	2,49E-12	4,80E-12	2,55E-12	1,16E-12	0,457
5997	1,80E-12	1,62E-12	1,92E-12	2,53E-12	4,69E-12	2,51E-12	1,13E-12	0,450
5998	1,82E-12	1,72E-12	1,89E-12	2,76E-12	4,67E-12	2,57E-12	1,11E-12	0,433
5999	1,96E-12	1,77E-12	1,91E-12	2,52E-12	4,64E-12	2,56E-12	1,07E-12	0,419
Vnitřní rezistivita [Ω.cm]	1,49E+17	1,65E+17	1,51E+17	1,15E+17	6,67E+16	Průměrná rezistivita [Ω.cm]	1,29E+17	

Tabulka 3: Absorpční hodnoty pro Relastik

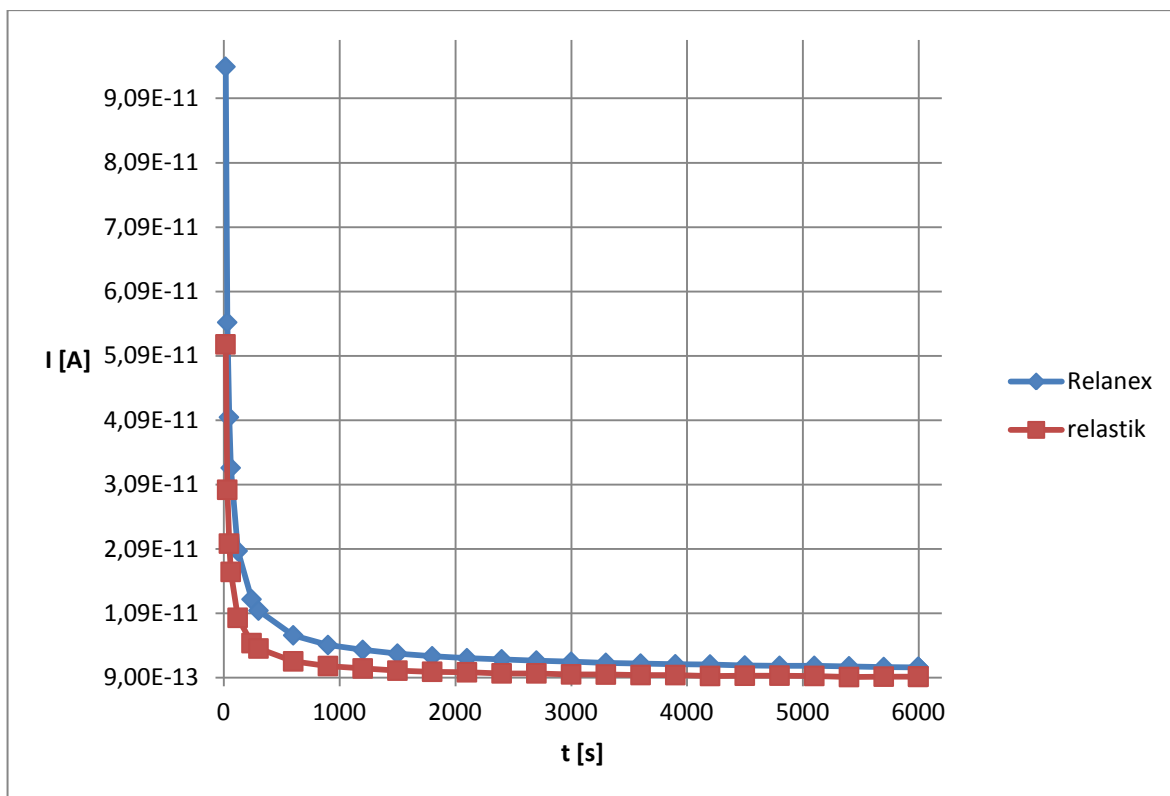
Absorbce	Relastik 1	Relastik 2	Relastik 3	Relastik 4	Relastik 5	Průměr proudu [A]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
čas [s]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]			
0,000192	3,68E-10	3,37E-10	4,32E-10	4,06E-10	4,99E-10	4,09E-10	5,55E-11	0,136
15	4,81E-11	4,42E-11	5,56E-11	5,37E-11	6,18E-11	5,27E-11	6,10E-12	0,116
30	2,78E-11	2,55E-11	3,13E-11	3,13E-11	3,46E-11	3,01E-11	3,16E-12	0,105
45	2,02E-11	1,86E-11	2,22E-11	2,30E-11	2,46E-11	2,17E-11	2,10E-12	0,097
60	1,62E-11	1,47E-11	1,76E-11	1,87E-11	1,95E-11	1,73E-11	1,73E-12	0,100
120	9,70E-12	8,67E-12	9,97E-12	1,14E-11	1,12E-11	1,02E-11	1,02E-12	0,100
240	6,07E-12	5,35E-12	5,93E-12	7,33E-12	6,65E-12	6,27E-12	6,75E-13	0,108
300	5,17E-12	4,52E-12	5,25E-12	6,37E-12	5,84E-12	5,43E-12	6,30E-13	0,116
600	3,29E-12	2,88E-12	3,26E-12	4,26E-12	3,48E-12	3,43E-12	4,59E-13	0,134
900	2,49E-12	2,32E-12	2,58E-12	3,53E-12	2,60E-12	2,70E-12	4,23E-13	0,156
1200	2,26E-12	2,09E-12	2,03E-12	3,05E-12	2,21E-12	2,33E-12	3,71E-13	0,159
1500	1,82E-12	1,77E-12	1,81E-12	2,57E-12	1,99E-12	1,99E-12	3,00E-13	0,151
1800	1,77E-12	1,76E-12	1,59E-12	2,13E-12	1,84E-12	1,82E-12	1,77E-13	0,097
2100	1,80E-12	1,57E-12	1,42E-12	2,20E-12	1,70E-12	1,74E-12	2,65E-13	0,152
2400	1,34E-12	1,43E-12	1,32E-12	2,14E-12	1,60E-12	1,57E-12	3,05E-13	0,195
2700	1,52E-12	1,36E-12	1,51E-12	1,89E-12	1,56E-12	1,57E-12	1,75E-13	0,112
3000	1,36E-12	1,18E-12	1,37E-12	1,74E-12	1,40E-12	1,41E-12	1,83E-13	0,130
3300	1,24E-12	1,31E-12	1,13E-12	1,82E-12	1,40E-12	1,38E-12	2,38E-13	0,173
3600	1,39E-12	1,02E-12	1,09E-12	1,76E-12	1,27E-12	1,31E-12	2,64E-13	0,202
3900	1,37E-12	1,12E-12	1,24E-12	1,49E-12	1,27E-12	1,30E-12	1,24E-13	0,095
4200	1,25E-12	1,10E-12	9,04E-13	1,42E-12	1,13E-12	1,16E-12	1,70E-13	0,147
4500	1,08E-12	1,04E-12	1,10E-12	1,52E-12	1,26E-12	1,20E-12	1,78E-13	0,148
4800	1,06E-12	1,13E-12	1,12E-12	1,52E-12	1,22E-12	1,21E-12	1,64E-13	0,135
5100	1,19E-12	9,64E-13	1,05E-12	1,54E-12	1,08E-12	1,16E-12	2,00E-13	0,172
5400	9,06E-13	9,19E-13	8,84E-13	1,31E-12	9,50E-13	9,93E-13	1,58E-13	0,159
5700	1,04E-12	1,06E-12	8,85E-13	1,32E-12	9,74E-13	1,06E-12	1,47E-13	0,139
5997	1,01E-12	9,03E-13	9,47E-13	1,36E-12	9,37E-13	1,03E-12	1,70E-13	0,165
5998	9,81E-13	1,05E-12	1,03E-12	1,33E-12	7,32E-13	1,02E-12	1,89E-13	0,185
5999	1,18E-12	8,29E-13	9,75E-13	1,37E-12	9,46E-13	1,06E-12	1,92E-13	0,181
Vnitřní rezistivita [Ω.cm]	3,60E+17	4,85E+17	4,14E+17	3,03E+17	4,65E+17	Průměrná rezistivita [Ω.cm]	4,05E+17	

Tabulka 4: Resorpční hodnoty pro Relanex

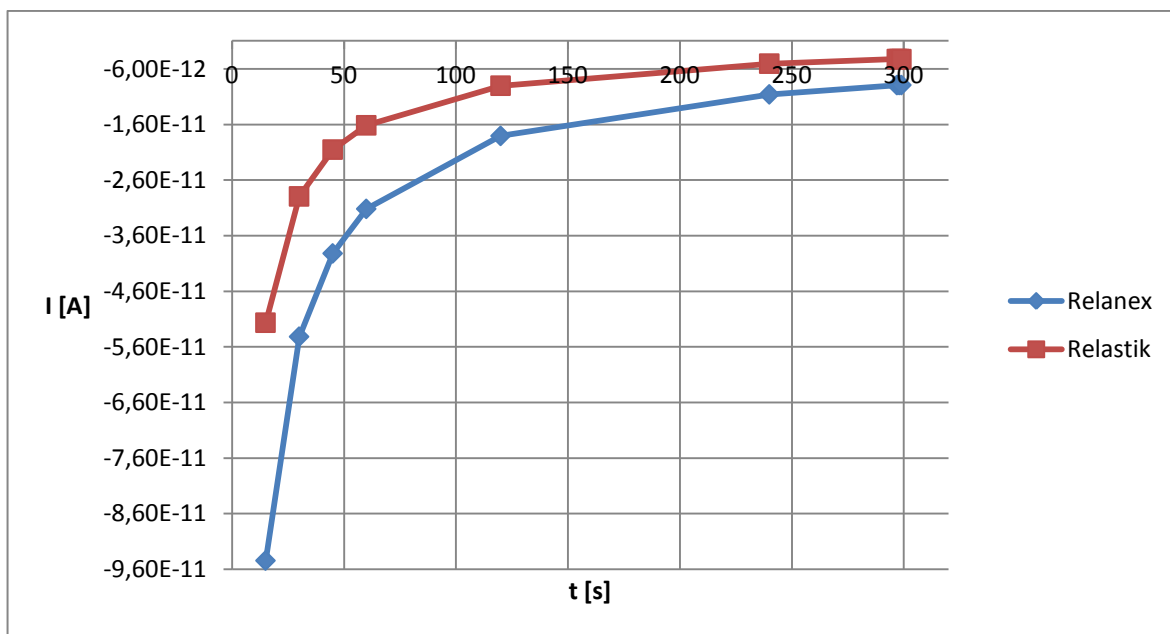
Resorpce	Relanex 1	Relanex 2	Relanex 3	Relanex 4	Relanex 5	Průměr proudu [A]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
čas [s]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]			
0,000193	-7,05E-10	-6,28E-10	-6,74E-10	-7,14E-10	-7,38E-10	-6,92E-10	3,80E-11	-0,055
15	-9,14E-11	-7,93E-11	-8,65E-11	-1,03E-10	-1,12E-10	-9,44E-11	1,17E-11	-0,124
30	-5,13E-11	-4,43E-11	-4,88E-11	-5,94E-11	-6,71E-11	-5,42E-11	8,13E-12	-0,150
45	-3,66E-11	-3,15E-11	-3,50E-11	-4,31E-11	-4,99E-11	-3,92E-11	6,52E-12	-0,166
60	-2,87E-11	-2,48E-11	-2,77E-11	-3,43E-11	-4,03E-11	-3,12E-11	5,52E-12	-0,177
120	-1,61E-11	-1,41E-11	-1,58E-11	-1,98E-11	-2,45E-11	-1,81E-11	3,73E-12	-0,206
240	-9,37E-12	-7,98E-12	-9,08E-12	-1,15E-11	-1,50E-11	-1,06E-11	2,49E-12	-0,235
297	-7,77E-12	-6,82E-12	-7,60E-12	-9,63E-12	-1,28E-11	-8,91E-12	2,13E-12	-0,239
298	-7,76E-12	-6,69E-12	-7,69E-12	-9,66E-12	-1,27E-11	-8,90E-12	2,13E-12	-0,239
299	-7,76E-12	-6,73E-12	-7,63E-12	-9,71E-12	-1,27E-11	-8,91E-12	2,14E-12	-0,240

Tabulka 5: Resorpční hodnoty pro Relastik

Resorpce	Relastik 1	Relastik 2	Relastik 3	Relastik 4	Relastik 5	Průměr proudu [A]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
čas [s]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]			
0,000193	-3,67E-10	-3,52E-10	-4,41E-10	-4,09E-10	-4,91E-10	-4,12E-10	5,04E-11	-0,122
15	-4,70E-11	-4,37E-11	-5,53E-11	-5,14E-11	-6,09E-11	-5,17E-11	6,07E-12	-0,118
30	-2,66E-11	-2,46E-11	-3,05E-11	-2,94E-11	-3,36E-11	-2,89E-11	3,12E-12	-0,108
45	-1,90E-11	-1,75E-11	-2,15E-11	-2,10E-11	-2,36E-11	-2,05E-11	2,10E-12	-0,103
60	-1,50E-11	-1,38E-11	-1,69E-11	-1,67E-11	-1,83E-11	-1,61E-11	1,56E-12	-0,097
120	-8,59E-12	-7,69E-12	-9,13E-12	-9,56E-12	-1,01E-11	-9,02E-12	8,40E-13	-0,093
240	-4,73E-12	-4,33E-12	-5,10E-12	-5,67E-12	-5,46E-12	-5,06E-12	4,84E-13	-0,096
297	-4,02E-12	-3,67E-12	-4,13E-12	-4,75E-12	-4,57E-12	-4,23E-12	3,87E-13	-0,092
298	-4,05E-12	-3,64E-12	-4,28E-12	-4,74E-12	-4,47E-12	-4,23E-12	3,74E-13	-0,088
299	-3,99E-12	-3,65E-12	-4,28E-12	-4,76E-12	-4,57E-12	-4,25E-12	3,99E-13	-0,094



Obr. 4: Průměrné hodnoty proudu - Absorpce



Obr. 5: Průměrné hodnoty proudu - Resorpce

4.5 Porovnání hodnot vnitřní rezistivity

Následující tabulka zobrazuje porovnání vnitřních rezistivit pevných izolantů. Jak můžeme vidět, dva měřené materiály (Relanex, Relastik) mají hodnotu vnitřní rezistivity v porovnání s tabulkovou hodnotou některých materiálů přibližně o řád větší.

Tabulka 6: Hodnoty vnitřních rezistivit pevných materiálů [2–4, 10–20]

Materiál	Vnitřní rezistivita
Azbest	1,00E+10 [Ω .cm]
Biotot	1,00E+13 [Ω .cm]
Dřevo (0 % vlhkosti)	1,00E+14 [Ω .cm]
Dřevo (20 % vlhkosti)	1,00E+07 [Ω .cm]
Epoxidová pryskyřice	1,00E+12 [Ω .cm]
Ertalon 66 SA	1,00E+14 [Ω .cm]
Jantar	1,00E+18 [Ω .cm]
Kalafuna	1,00E+15 [Ω .cm]
Kapton Type HN	1,50E+17 [Ω .cm]
Lexan 9034	8,20E+16 [Ω .cm]
Makrolon	1,00E+16 [Ω .cm]
Muskovit	1,00E+16 [Ω .cm]
Nomex Type 418	1,00E+16 [Ω .cm]
Papír	5,00E+17 [Ω .cm]
Polyesterové pryskyřice	1,00E+16 [Ω .cm]
Polyetylén	1,00E+17 [Ω .cm]
Polystyren	1,00E+16 [Ω .cm]
Polyvinylchlorid	1,00E+16 [Ω .cm]
Relastik-tabulková hodnota	1,00E+15 [Ω .cm]
Relanex-tabulková hodnota	1,00E+15 [Ω .cm]
Relanex-změřená hodnota	1,29E+17 [Ω .cm]
Relastik-změřená hodnota	4,05E+17 [Ω .cm]
Rexolite 2300 glass filled	5,00E+13 [Ω .cm]
Skleněné vlákno- E glass	4,02E+14 [Ω .cm]
Skleněné vlákno- ECRGLASS	3,84E+14 [Ω .cm]
Šelak	1,00E+16 [Ω .cm]
Techtron	1,00E+14 [Ω .cm]
Ultem 1000 unfilled	6,70E+17 [Ω .cm]

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá elektrickou vodivostí izolačních materiálů. Teoretická část byla zaměřena na izolační materiály v jednotlivých skupenství a na jejich elektrické vodivosti. Následně byli v kapitole 1 podrobně popsáni zástupci pevných, kapalných a plynných izolačních materiálů. V následující kapitole byly popsány vodivosti ve všech skupenstvích.

Praktická část byla zaměřena na měření vnitřní rezistivity izolačních materiálů Relanex a Relastik. Pro každý materiál bylo změřeno pět vzorků. Měření, které probíhalo dle normy ČSN IEC 93, bylo prováděno na měřicím zařízení KEITHLEY. Měřil se proud tekoucí vzorkem v jednotlivých časech a z těchto proudů se poté sestavovaly absorpční a resorpční charakteristiky. Pro absorpční charakteristiky jsou hodnoty proudů pro jednotlivé vzorky uvedeny v tabulkách 1, popř. 2 v podkapitole 4.4. Hodnoty proudů pro sestavení resorpční charakteristiky jsou v *Tabulkách 3,4*. V *Tabulkách 1 a 2* je vypočítaná průměrná vnitřní rezistivita pro jednotlivé materiály a tyto hodnoty jsou porovnány v *Tabulce 5* v podkapitole 4.5 s dalšími hodnotami pevných izolačních materiálů.

Z měřených vzorků vyšel nejlépe vzorek Relastik 2, kterému byla dopočítána vnitřní rezistivita $4,85 \cdot 10^{17}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]. Nejhorší vnitřní rezistivitu měl vzorek Relanex 5, jehož rezistivita nabývala hodnoty $6,67 \cdot 10^{16}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]. Při porovnání obou materiálů vyšel lépe materiál Relastik.

Při srovnání změřených výsledků s katalogovými hodnotami které uvádí výrobce, lze tvrdit, že měřené materiály jsou v dobrém stavu a mají odpovídající vnitřní rezistivitu. Výrobce uvádí minimální vnitřní rezistivitu Relanexu $1 \cdot 10^{15}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$] [10], průměrná naměřená hodnota byla $1,29 \cdot 10^{17}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]. U materiálu Relastik byla naměřena vnitřní rezistivita $4,05 \cdot 10^{17}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$] a výrobce udává hodnotu $1 \cdot 10^{15}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$] [11].

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] MENTLIK, Václav. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Ediční středisko ZČU, 1995. ISBN 80-7082-227-9.
- [3] DUBSKÝ, Jan. *Elektrotechnické materiály*. 2. vyd. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1972. ISBN 55-091-72.
- [4] HASSDENTEUFEL, Josef. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1967. ISBN 04-540-67.
- [5] Izolanty. *unob.cz* [online]. [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: http://user.unob.cz/leuchter/4_P%C5%98_BAK_izolanty.pdf
- [6] *Elektronová vodivost izolantu* [online]. [vid. 24. únor 2016]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/polo3.gif>
- [7] JÁN, Artbauer. *Izolanty a izolácie*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo ALFA, 1969. ISBN 63-060-69.
- [8] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [9] *ČSN IEC 93 (346460): Skúšky tuhých elektroizolačných materiálov. Metódy merania vnútornej resistivity a povrchovej resistivity tuhých elektroizolačných materiálov*. 2. Bratislava: VÚKI Bratislava, a. s., 1993.
- [10] Relanex. *Cogebi* [online]. [vid. 23. květen 2016]. Dostupné z: http://www.fkaeng.com/userfiles/45011RLX_cogebi1.pdf
- [11] Relastik. *Cogebi* [online]. [vid. 23. květen 2016]. Dostupné z: http://www.fkaeng.com/userfiles/45013REL_cogebi.pdf
- [12] Skleněná vlákna. *AGY* [online]. 2006 [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: http://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf

- [13] Kapton. *DuPont* [online]. [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf>
- [14] Nomex. *DuPont* [online]. 2003 [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Energy_Solutions/en_US/assets/downloads/418_419.pdf
- [15] Ertalon. *Quadrant* [online]. 2003 [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: http://www.theplasticshop.co.uk/plastic_technical_data_sheets/nylon_66_technical_data_sheet.pdf
- [16] Lexan. *GE* [online]. [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: http://www.associatedplastics.com/forms/pc_lexan_9034.pdf
- [17] Makrolon. *Bayer MaterialScience* [online]. 2007 [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: http://www.ledil.com/sites/default/files/Documents/Technical/Material/PC_Makrolon_2405_2407_2456-Datasheet.pdf
- [18] *Rexolite 2300* [online]. [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwitoLLbp_XMAhWFWSwKHcyTA0kQFggrMAI&url=https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/content/RexoliteDataSheet.doc&usg=AFQjCNGv6-Cbqr4BpWeaX8JS0SHHXnSIFw&sig2
- [19] Techtron. *Quadrant* [online]. 2011 [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiN1erdqPXMAhXG6CwKHcmIDzMQFggoMAE&url=http://www.polylanema.pt/download.php?f=94&key=7ec2fe947e1aec797cf39e2be9cd8fd8&usg=AFQjCNH4paDmPzKdaOm44cYdlMxY_MzUVVQ&sig2=76t
- [20] Ultem 1000. *WS Hampshire* [online]. [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.wshampshire.com/pdf/ultem.pdf>