

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Životnost a spolehlivost materiálů v elektrotechnice

**vedoucí práce: Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
autor: Bc. Martin Branšovský**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin BRANŠOVSKÝ**
Osobní číslo: **E09N0251P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Životnost a spolehlivost materiálů v elektrotechnice**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište typy elektroizolačních materiálů.
2. Popište způsoby degradace elektroizolačních materiálů a jejich dopad na životnost a spolehlivost el. zařízení.
3. Popište způsoby zjišťování stavu elektroizolačních systémů.
4. Navrhněte postupy pro určení zbytkové životnosti elektroizolačních systémů.
5. Popište vzájemnou vazbu životnosti a spolehlivosti elektrických zařízení.

Anotace

V této práci je uvedeno základní rozdělení izolantů. Jsou zde popsány základní, a pro elektroizolační materiály klíčové, vlastnosti charakterizující daný materiál. Dále různé druhy vnějších i vnitřních vlivů, které způsobují degradaci. Degradální procesy jsou v práci objasněny pomocí matematických modelů stárnutí, na základě kterých lze určit životnost daného materiálu. V neposlední řadě práce obsahuje rozdělení a popis vybraných diagnostických metod a závěrem návrh postupů pro určení zbytkové životnosti izolačního systému.

Klíčová slova

Životnost, spolehlivost, degradační účinky, izolační materiál, diagnostické metody, on-line diagnostika, off-line diagnostika, zbytková životnost, ztrátový činitel, kapacita vinutí, částečné výboje, dielektrikum, izolační materiál, model stárnutí

Abstract

Durability and reliability of the materials in electrical engineering

In this thesis is described basic sorting of insulating material. It describes basic electrical materials and key properties that is characterizing the material and various types of external and internal influences that is cause of a degradation. Mathematical models of aging processes are described in this thesis and determining the lifetime of materials can be based on this models. Finally, this thesis contains a classification and description of selected diagnostic methods and proposal of procedures for determining the residual lifetime of the insulation system

Key words

Durability, reliability, effects of degradation, insulating material, diagnostic methods, on-line diagnostics, off-line diagnostics, residual lifetime, dissipation factor, winding capacity, partial discharges, dielectric, insulating material, aging model

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne 7.5.2012

Martin Branšovský

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za vedení této diplomové práce. Dále děkuji všem vyučujícím, díky kterým jsem získával v průběhu studia odborné znalosti.

OBSAH

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ LÁTEK.....	12
2 VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	15
2.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ.....	15
2.1.1 <i>Elektrická vodivost dielektrik.....</i>	15
2.1.1.1 Elektrická vodivost plyných izolantů	16
2.1.1.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů	18
2.1.1.3 Elektrická vodivost pevných izolantů.....	21
2.1.2 <i>Dielektrická polarizace.....</i>	22
2.1.3 <i>Dielektrické ztráty v izolantech.....</i>	24
2.1.3.1 Dielektrické ztráty v plyných izolantech	27
2.1.3.2 Dielektrické ztráty v kapalných izolantech	27
2.1.3.3 Dielektrické ztráty v pevných izolantech	29
2.1.3.4 Dielektrické ztráty homogenních a nehomogenních izolantů.....	30
2.1.4 <i>Permitivita</i>	30
2.1.5 <i>Elektrická pevnost izolantů</i>	31
2.1.5.1 Elektrická pevnost plyných izolantů.....	32
2.1.5.2 Elektrická pevnost kapalných izolantů.....	33
2.1.5.3 Elektrická pevnost pevných izolantů.....	34
2.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ.....	35
2.2.1 <i>Tahové vlastnosti izolantů.....</i>	35
2.2.2 <i>Ohybové vlastnosti izolantů</i>	37
2.2.3 <i>Rázová houževnatost.....</i>	38
2.3 TEPELNÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ	39
2.4 TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU.....	41
3 ROZDĚLENÍ IZOLANTŮ.....	42
3.1 PLYNNÉ IZOLANTY	42
3.2 KAPALNÉ IZOLANTY.....	44
3.3 PEVNÉ IZOLANTY ANORGANICKÉ	47
3.4 PEVNÉ IZOLANTY ORGANICKÉ PŘÍRODNÍ.....	51
3.5 SYNTETICKÉ MAKROMOLEKULÁRNÍ LÁTKY	52
3.6 TEPLOTNÍ KLASIFIKACE ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	58
4 DEGRADACE ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ.....	61
4.1 ELEKTRICKÉ STÁRNUTÍ	61
4.2 TEPELNÉ STÁRNUTÍ	64
4.3 STÁRNUTÍ NA ZÁKLADĚ PŮSOBNÍ OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ.....	65
4.4 MODELÝ STÁRNUTÍ PŘI PŮSOBNÍ JEDNOHO FAKTORU	66
4.4.1 <i>Modely mechanického stárnutí</i>	66
4.4.2 <i>Modely elektrického stárnutí.....</i>	67

4.4.3	<i>Modely tepelného stárnutí</i>	69
4.5	VÍCEFAKTOROVÉ MODELY	69
4.5.1	<i>Simoniho model</i>	70
4.5.2	<i>Ramuív model</i>	72
4.5.3	<i>Fallouív modell</i>	72
4.5.4	<i>Crineív model</i>	73
4.5.5	<i>Model kombinovaného tepelného a elektrického stárnutí pulzním napětím</i>	75
5	ŽIVOTNOST A SPOLEHLIVOST ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	76
6	DIAGNOSTIKA ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ	79
6.1	DIAGNOSTIKA ON-LINE A OFF-LINE	81
6.1.1	<i>Off-line diagnostika</i>	82
6.1.2	<i>On-line diagnostika</i>	83
6.2	MOŽNOST PŘEDPOVĚDI CHOVÁNÍ DIAGNOSTIKOVANÉHO OBJEKTU	84
6.3	ELEKTRICKÉ DIAGNOSTICKÉ METODY	87
6.3.1	<i>Měření absorpčních a resorpčních charakteristik</i>	87
6.3.2	<i>Měření ztrátového činitele a permitivity</i>	88
6.3.3	<i>Napěťové zkoušky</i>	89
6.3.4	<i>Měření kapacit</i>	90
6.3.5	<i>Metody měření částečných výbojů</i>	90
6.4	STRUKTURÁLNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY	94
6.4.1	<i>Metody založená na zjišťování hmotnosti</i>	94
6.4.2	<i>Metody založené na měření energie</i>	95
6.4.3	<i>Metody založené na měření mechanických vlastností</i>	97
6.4.4	<i>Metody vhodné pro ON-LINE diagnostiku</i>	100
6.4.5	<i>Jiné principy strukturálních diagnostických metod</i>	100
7	NÁVRH POSTUPŮ PRO ZJIŠTĚNÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ	101
7.1	URČOVÁNÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI NA ZÁKLADĚ OFF-LINE DIAGNOSTIKY VÝSKYTU ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V ELEKTROIZOLAČNÍM SYSTÉMU TRANSFORMÁTORU.	101
7.1.1	<i>Přístrojové vybavení a popis měřicího obvodu</i>	101
7.1.2	<i>Postup měření</i>	102
7.1.3	<i>Vyhodnocení naměřených hodnot</i>	103
7.2	URČOVÁNÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI IZOLAČNÍHO SYSTÉMU NA ZÁKLADĚ OFF-LINE DIAGNOSTIKY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE $TG \delta$ A KAPACITY VINUTÍ TRANSFORMÁTORU	104
7.2.1	<i>Přístrojové vybavení a popis měřicího obvodu</i>	105
7.2.2	<i>Postup měření</i>	106
7.2.3	<i>Vyhodnocení naměřených hodnot</i>	107
ZÁVĚR		108

Úvod

Elektrické zařízení můžeme chápat jako sériový spolehlivostní řetězec podsystémů a prvků. O funkční spolehlivosti takového řetězce rozhoduje nejcitlivější článek, kterým je v uvedeném případě dielektrický podsystém s jeho prvky a použitými izolanty. Ty jsou při provozu elektrického zařízení podrobně zkoumány a je tak zjišťován jejich stav a vliv z hlediska funkce, provozní spolehlivosti a bezpečnosti elektrického zařízení. Kvalitu a spolehlivost izolačního systému elektrického zařízení je nutné posuzovat i z ekonomického hlediska. Při masové produkci je vyžadováno dosažení největší možné spolehlivosti s vynaložením minimálních finančních prostředků. V případě klíčových zařízení, nebo zařízení, pracujících s vysokými výkony např. v energetice je žádoucí, aby k jejich poruchám docházelo co nejméně a aby bylo možné havarijním stavům předcházet. K tomuto účelu nám slouží diagnostické systémy, které v průběhu provozu elektrického zařízení zajišťují a testují bezporuchový chod. Na základě naměřených hodnot a matematicko fyzikálních modelech určují stav elektrického zařízení, případně upozorňují na možnou budoucí poruchu nebo nestandardní stav.

Seznam symbolů

q	elementární náboj
γ	konduktivita
γ_p	povrchová konduktivita
K	kelvin
t	čas
ρ	rezistivita
ρ_v	vnitřní rezistivita
ρ_s	povrchová rezistivita
R	elektrický odpor
R_i	izolační odpor dielektrika
I	elektrický proud
I_p	elektrický proud tekoucí po povrchu izolantu
S	plocha
E	intenzita elektrického pole
b	driftová pohyblivost iontů
\vec{P}	vektor polarizace dielektrika
$\vec{\Delta M}$	dipólový moment
$P_{z_{ss}}$	ztrátový výkon v dielektriku při působení ss elektrického proudu
U	elektrické napětí
U_p	průrazné napětí
U_e	zhášecí napětí
ss	stejnoseměrný
δ	ztrátový úhel
$tg\delta$	ztrátový činitel
D	elektrická indukce
ε	permitivita
ε_r	relativní permitivita
ε_*	permitivita vakua
E_p	elektrická pevnost
h, d	tloušťka vzorku
b_+	pohyblivost kladných nosičů náboje
b_-	pohyblivost záporných nosičů náboje
g	koeficient generace
r	koeficient rekombinace
n	koncentrace volných nosičů náboje
W	výška potenciálové bariéry oddělující rovnovážné polohy
l	vzdálenost rovnovážných poloh
T	termodynamická teplota
T_0	pokožová teplota

f	kmitočet
η	dynamická viskozita
C	kapacita
κ	dielektrická susceptibilita
ε_*	permitivita vakua
F	síla
σ_M	mez pevnosti v tahu
σ_{fM}	pevnost v ohybu
σ_f	napětí v ohybu
ε_{fM}	deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu
E_t	modul pružnosti v tahu
E_f	modul pružnosti v ohybu
σ	napětí v tahu
ε	poměrné prodloužení
ε_t	jmenovité poměrné prodloužení
l_0	počáteční měřená délka zkušebního tělesa
Δl_0	zvětšení délky zkušebního tělesa
μ_n	poissonův poměr
a_{cU}	rázová houževnatost Charpy zkušebního tělesa bez vrubu
a_{cN}	rázová houževnatost Charpy zkušebního tělesa opatřeného vrubem
b_N	šířka zkušebního tělesa pod vrubem
C	tepelná kapacita
c	měrná tepelná kapacita
Q	teplo, tepelná vodivost
Q_0	aktivační energie samodifuze
ΔT	rozdíl teplot mezi počátečním a konečným stavem
λ	měrná tepelná vodivost
α	teplotní součinitel délkové roztažnosti
β	teplotní součinitel objemové roztažnosti
T_t	teplota tuhnutí
T_{vz}	teplota vzplanutí
T_m	teplota měknutí
T_g	teplota skelného přechodu
P_M	stupeň polymerace
τ	doba života
V_a	objem molu atomů
m	ukazatel schopnosti hromadit vakance
W_a	aktivační energie procesu
p	limitní hodnota vlastnosti
R	intenzita degradace materiálu
L_0	čas do selhání při pokojové teplotě
λ	vzdálenost mezi oběma stavy (šířka energetické bariéry)
π	pí – ludolfovo číslo
Q_V	výsledná spolehlivost

1 Základní rozdělení látek

Budeme-li rozdělovat látky a materiály¹, které se používají v elektrotechnice, můžeme to udělat třemi způsoby.

První způsob rozdělení je dle získaných informací o jejich struktuře. Například využití poznatků o vazbách, jimiž vznikly a kterými jsou tvořeny. Z tohoto důvodu mají pro charakter látky zásadní význam. Druhý způsob je dělení z hlediska skupenství a třetí zkoumá vlastnosti nosičů elektrických nábojů, které jsou v materiálu přítomny.

Nosičem elektrického náboje jsou částice (ionty nebo elektrony) nesoucí elementární náboj q [C]. Rozhodující je míra volnosti jejich pohybu. Velikost vazebních sil ve struktuře látky rozděluje nosiče elektrického náboje na volné a vázané. Volné nosiče se v materiálu pohybují. Proto se látky s vysokou koncentrací volných nosičů vyznačují vysokou elektrickou vodivostí. V tomto případě se jedná o volné ionty, které vznikají disociací² molekul nečistot. Někdy disociací molekul vlastní látky. Volné ionty látek velmi ovlivňují elektrickou vodivost, která je pro ně významně charakteristická. Odlišně se ve vnějším elektrickém poli chovají látky elektricky vodivé, polovodiče a dielektrika (případně izolanty). Naopak vázané nosiče jsou pevně drženy v blízkém okolí svých rovnovážných poloh a působící elektrické pole pouze vyvolá malou změnu polohy. Nikoliv však změnu polohy na velké vzdálenosti. Velkou vzdáleností zde rozumíme několiknásobek mřížkové konstanty. Jsou to tedy takové nosiče elektrického náboje, které mají pevně dané místo ve struktuře látky.

Koncentrace a druh nosičů elektrického náboje ovlivňuje chování látek po vložení do vnějšího elektrického pole. Reálné materiály rozdělujeme dle obsaženého množství volných nosičů náboje (konduktivity γ).

¹ Látky cíleně upravené za účelem splnění požadovaného úkolu v technickém zařízení na potřebné úrovni.

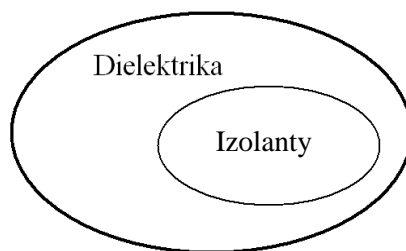
² Děj, při kterém dochází ke štěpení komplexů, molekul nebo solí na menší molekuly, ionty nebo radikály. Tento proces je ve většině případů vratný. Jedná se o opačný děj k asociaci a rekombinaci.

Rozdělení látek dle hodnoty konduktivity γ :

- Vodiče $\gamma > 10^5$ [S·m⁻¹]
- Polovodiče $10^{-8} < \gamma < 10^5$ [S·m⁻¹]
- Izolanty $\gamma < 10^{-8}$ [S·m⁻¹]

Reálný izolant bude mít v každém případě určitou měřitelnou elektrickou vodivost, protože bude vždy obsahovat určité množství volných nosičů elektrického náboje. Ty přispívají v časově proměnných polích k dielektrickým ztrátám. Přítomnost volných nosičů náboje má vliv na elektrickou vodivost izolantu a svou roli hrají i v jevech způsobujících průraz izolantu. Z toho důvodu není výrazný skokový rozdíl mezi vodiči a izolanty. Známe celou skupinu materiálů, jejichž chování se podle podmínek spíše přiklání ke skupině buď izolantů anebo vodičů. Přiřazení materiálu k určité skupině dále ovlivňují vnější podmínky, jakými jsou teplota, tlak, frekvence přiloženého napětí a intenzita působícího elektrického pole. Významným faktorem je teplota materiálu. Například sklo je při vysokých teplotách taveno a při této změně skupenství na kapalné se stává vodičem. Naopak kovy se při vysokých teplotách a změnou skupenství na plynné stávají izolanty. Při teplotách blízcích se k 0 K se zase některé kovy stávají supravodivými³ a polovodivé materiály dobrými izolanty. Z toho vyplývá, že rozdělení materiálů v praxi obecně platí. V potaz ale musí být brány aktuální podmínky, v nichž se daný materiál vyskytuje.

V praxi bývá pojem dielektrikum a izolant často zaměňován. Je to z toho důvodu, že pojem dielektrikum je obecnější než pojem izolant. Z toho vyplývá, že každý izolant je dielektrikum. Naopak však neplatí, že každé dielektrikum je izolantem. Tuto definici můžeme vyjádřit pomocí *obr. 1.1*. Izolanty jsou podmnožinou dielektrik.



Obr. 1.1 Dielektrika s podmnožinou izolantů

³ Supravodič je kovový drát, slitina kovu nebo sloučenina, která vede elektrický proud téměř bez odporu, jestliže teplota klesne pod určitý bod. Odpor je nežádoucí, protože způsobuje ztrátu energie proudící v materiálu.

Dielektrikum je látka, která má po vložení do vnějšího elektrického pole schopnost vytvářet a uchovávat vlastní elektrické pole. Je to tedy taková látka, která se působením vnějšího elektrického pole polarizuje. Tato schopnost látkám zapůjčila název. Předpona „di“ značí směr dovnitř a pojem dielektrikum tedy vyjadřuje látku vnitřně zelektrizovanou.

Izolant je materiál, který neobsahuje volné nosiče nábojů, anebo je obsahuje pouze v zanedbatelném množství. Nevede tedy elektrický proud mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem.[1,3]

Pokud má být materiál dobrým izolantem, musí vykazovat určité vlastnosti, a to zejména vlastnosti elektrické. Mezi ně patří elektrická pevnost (co nejvyšší), rezistivita (u dobrých izolantů větší než $10^{12}\Omega\cdot\text{m}$), relativní permitivita (v řádu jednotek) a ztrátový činitel (co nejmenší).

Kromě výše uvedených elektrických vlastností musí izolanty splňovat i celou řadu dalších vlastností: mechanické (pevnost, pružnost), teplotní (tepelná vodivost, odolnost proti teplu a hoření, teplota tání) a fyzikálně-chemické (chemická odolnost, navlhavost).[3]

2 Vlastnosti izolačních materiálů

2.1 Elektrické vlastnosti izolantů

2.1.1 Elektrická vodivost dielektrik

Z pohledu využívání izolačních materiálů v elektrotechnice potřebujeme ideálně takové materiály, které nemají volné nosiče elektrického náboje a neobsahují žádné další nečistoty a příměsi. Takový materiál má nulovou elektrickou vodivost a považujeme ho za ideální izolant. V praxi používané izolační materiály ale těchto vlastností nedosahují a vykazují tak nenulovou elektrickou vodivost.

Pro hodnocení materiálů z hlediska elektrické vodivosti používáme *měrný elektrický odpor* neboli *rezistivitu* ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] a *měrnou elektrickou vodivost – konduktivitu* γ [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]. Měrný, na jednotku objemu přepočítaný, odpor či vodivost používáme zejména pro vzájemné porovnání dle vztahu:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}; \Omega \cdot \text{m}] \quad (2.1)$$

Hodnota rezistivity ρ je rovna odporu krychle o hraně 1 metru daného materiálu, kterou protéká proud mezi jejími dvěma protilehlými stěnami. Běžně se používají pro vyjádření rezistivity a konduktivity i menší jednotky $\Omega \cdot \text{cm}$ a $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Pro plochý vzorek materiálu a uvažované homogenní elektrický pole vyjádříme měrný elektrický odpor:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \quad [\Omega \cdot \text{m}; \Omega, \text{m}^2, \text{m}] \quad (2.2)$$

Kde R je hodnota změřeného (izolačního) odporu nepřeváděná na rozměry zkoušence, S je plocha elektrod a h je tloušťka vzorku. Okamžitou hodnotu izolačního odporu R určíme z přiloženého napětí a protékajícího proudu daným materiálem:

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega; \text{V}, \text{A}] \quad (2.3)$$

Pro získání hodnoty rezistivity ze vztahu (2.2), musíme výsledek přepočítat dle rozměru zkoušeného materiálu. Jednotlivé materiály samozřejmě nemůžeme porovnávat dle hodnot izolačního odporu R . Museli bychom mít k dispozici naprosto stejné zkušební vzorky.

Vznik a pohyb volných nosičů náboje, čili mechanismus vodivosti, je závislý na skupenství látek a na typu nosičů elektrického náboje. Tyto vlastnosti se výrazně odlišují u jednotlivých typů skupenství a jsou způsobeny převážně různou vzdáleností částic látek a tím různou intenzitou vzájemného působení. Náboje jsou přenášeny elementárními částicemi a ionty v případě elektronové, děrové, protonové nebo iontové vodivosti. Nebo koloidními částicemi, což jsou větší skupiny částic u elektroforetické vodivosti. [1, 3]

2.1.1.1 Elektrická vodivost plyných izolantů

Plyny jsou za standardních podmínek výbornými izolanty. Je to především z důvodu malé koncentrace volných nosičů náboje. Za standardní podmínky lze považovat slabé elektrické pole a nízké teploty. Volné nosiče náboje u plyných izolantů vznikají především působením ionizačních činitelů elektrického původu, kosmickým nebo radioaktivním zářením. Vlivem ionizačních činitelů dochází k odtržení jednoho nebo více záporných elektronů z neutrálního atomu a tím dojde ke vzniku volných nosičů náboje – kladných iontů. Záporné ionty mohou vznikat zachytáváním elektronů na neutrálních atomech. Jedná se o ionizaci plynu, na základě které může dojít k průchodu elektrického proudu plyným izolantem. K ionizaci plynu dojde v případě pohlcení dostatečně velkého množství energie, tzv. ionizační energie a to několika způsoby. Pokud dojde ke srážce (rozumíme tím interakci silových polí způsobenou blízkým průletem a následnému vychýlení jejich drah) neutrální částice a elektronu, případně iontu, s dostatečně velikou kinetickou energií získanou působením elektrického pole. Jedná se o nárazovou ionizaci. V případě elektronů a iontů, které navýšili svou kinetickou energii na základě zvýšené teploty, se po srážkách s neutrálními částicemi jedná o tepelnou ionizaci. K fotoionizaci dochází, pohlcuje-li neutrální částice fotony. Na fotoionizaci se podílejí Rentgenové, kosmické a gama záření. Jako specifický typ ionizace plynu můžeme ještě uvést povrchovou ionizaci. Energií potřebnou pro tento typ ionizace je tepelná energie nebo různé druhy krátkovlnného záření působící na vnější povrch elektrod.

Nesamostatná elektrická vodivost plynů je určena slabým elektrickým polem. To vyplývá z výše uvedeného, kdy ke vzniku volných nosičů elektrického náboje dojde pouze v případě působení vnějších ionizačních činitelů. K samostatné elektrické vodivosti plynů dochází za působení silného elektrického pole, kde dochází k nárazové ionizaci s částicemi, které získali dostatečnou energii z působícího elektrického pole. Úzce to souvisí s problematikou elektrické pevnosti.

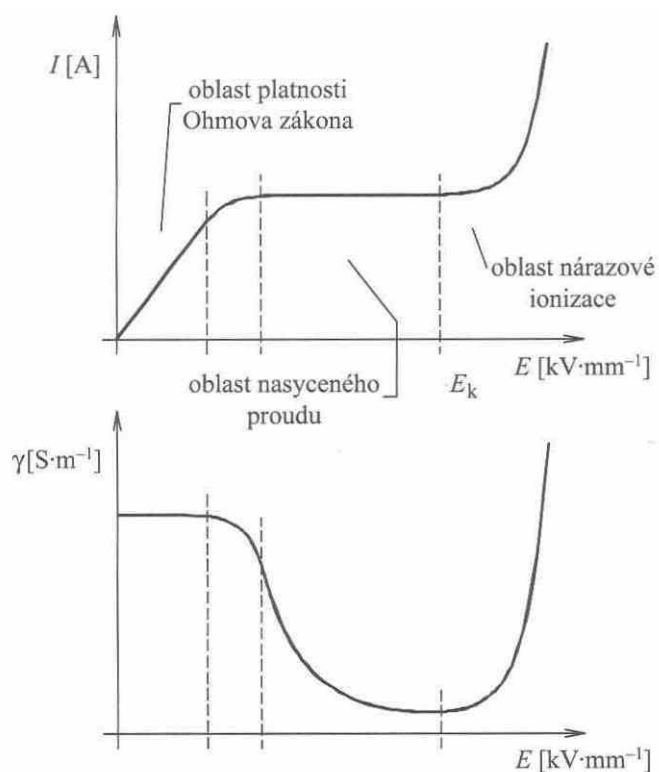
Současně s ionizací v plynech a tím způsobenému vzniku volných nosičů náboje dochází také k jejich zániku. Je to způsobeno buď neutralizací volných nosičů náboje na elektrodách a jejich odevzdání energie, nebo rekombinací. Rekombinace nastane, dojde-li ke srážce dvou nebo více částic opačné polarity. Tím vznikne neutrální částice. Rekombinace je přímo úměrná koncentraci iontových párů v plynu.

Elektrickou vodivost plynného izolantu můžeme vyjádřit vztahem:

$$\gamma = q \cdot \sqrt{\frac{g}{r} \cdot (b_+ + b_-)} \quad (2.4)$$

kde q je elektrický náboj volného nosiče, g je koeficient generace⁴ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], r koeficient rekombinace [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], b_+ , b_- je pohyblivost kladných, případně záporných nosičů náboje [1,3].

⁴ Ve vzduchu za normálních podmínek (20°C, 100 kPa) je $g=4 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, to znamená, že v 1 m^3 vznikne každou 1 s $4 \cdot 10^6$ elektronů a kladných iontů.



Obr. 2.1 VA charakteristika plyných izolantů a napěťová závislost jejich konduktivity, převzato z [1]

2.1.1.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů

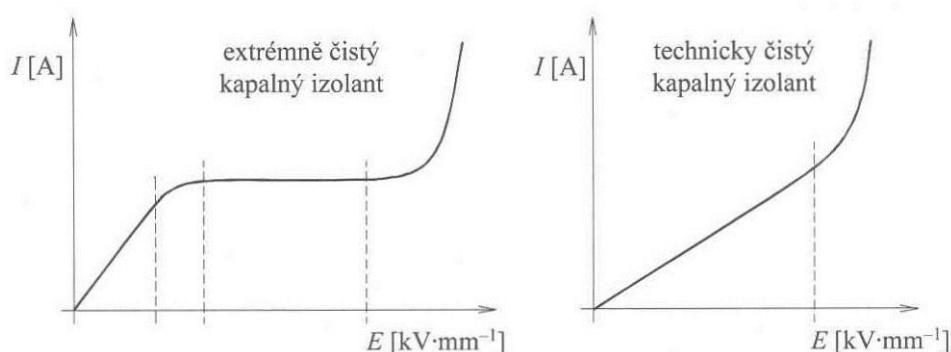
Kapaliny vznikají kondenzací (změnou skupenství z plynného na kapalné) plynů nebo tavením pevných látek (změna skupenství z pevného na kapalné). Mají mezimolekulární vzdálenosti výrazně menší než plyny, které jsou úměrné velikosti molekul, takže vzájemné ovlivňování molekul a jejich silové působení je silnější než v plynech, ale slabší než u pevných látek. Složení, struktura, obsah příměsí a nečistot významným způsobem ovlivňuje elektrickou vodivost kapalných izolantů. Podle obsahu nečistot rozlišujeme extrémně čisté kapalné izolanty a technicky čisté kapalné izolanty. Obecně lze konduktivitu kapalného izolantu vyjádřit vztahem:

$$\gamma = n \cdot q \cdot b \quad (2.5)$$

kde n je koncentrace volných nosičů náboje (iontů) [m^{-3}].

Extrémně čisté kapalné izolanty vznikají pečlivou rafinací a dokonalým odplyněním. Vykazují velmi nízkou hodnotu konduktivity ($\gamma=10^{-14}$ až $10^{-15} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) v důsledku přítomnosti volných nosičů náboje, které mohou vznikat ionizací nebo disociací molekul, případně tepelnou excitací⁵ elektronů.

Technicky čisté kapalné izolanty mají hodnotou konduktivity ($\gamma=10^{-11}$ až $10^{-12} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$). Rozdíl mezi extrémně a technicky čistým kapalným izolantem je patrný z obrázku 2.2. Překročí-li intenzita elektrického pole ve vzduchu mezní hodnotu blíží se k $E_k = 1 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, začne se tvořit nárazová ionizace. Tím dojde k exponenciálnímu navyšování proudové hustoty společně s nárůstem intenzity elektrického pole. Takový děj odpovídá třetí části charakteristik na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 VA charakteristika extrémně a technicky čistých kapalných izolačních látek, převzato z [1]

U extrémně čistých kapalných izolantů je patrná oblast nasyceného proudu podobně jako u plyných izolantů. U technicky čistých kapalných izolantů dle voltampérové charakteristiky tato část není. Vodivost technických izolantů je buďto iontová, nebo elektroforetická. Iontová elektrická vodivost kapalných izolantů se dále rozděluje na vlastní a nevlastní. O vlastní elektrickou vodivost se jedná v případě disociace molekul vlastního kapalného izolantu. Nevlastní elektrická vodivost nastává v případě přítomných disociovaných příměsí. Pro popis pohybu volného iontu kapalným izolantem se používá model dvojité potenciálové jámy. Pravděpodobnost přeskočení iontu mezi dvěma rovnovážnými stavy se popisuje Boltzmanovým

⁵ Excitace (neboli vybuzení) je fyzikální proces, při kterém dochází k přechodu energetického stavu atomu, molekuly či iontu na vyšší energetickou hladinu. K přechodu dochází např. absorpcí tepla či fotonu. Excitovaná částice se pak nachází v tzv. excitovaném stavu.[6]

rozdělením. Na základě tohoto rozdělení určíme počet přeskoků. Vnější podmínkou vyvolaná pomalá změna neboli driftová pohyblivost iontu vyvolaná působením elektrického pole je dána vztahem:

$$b = \frac{f_0 \cdot q \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (2.6)$$

kde W je výška potenciálové bariéry [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$] oddělující rovnovážné polohy vzdálené l [m], k je Boltzmannova konstanta ($k=1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), T je termodynamická teplota, f_0 je kmitočet vlastních tepelných kmitů okolo rovnovážných poloh (v řádech 10^{13} Hz), q je náboj iontu [C]. Po dosazení rovnice (2.6) do (2.5) dostaneme:

$$\gamma = \frac{n \cdot f_0 \cdot q^2 \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (2.7)$$

Elektroforetická vodivost je přítomna v koloidních⁶ systémech tvořených dvěma fázemi. První fáze je tvořena formou jemných částic nazývané disperzní fáze. Tato fáze je rozptýlena ve fázi druhé zvané disperzní prostředí. Pokud jsou obě fáze kapaliny, mluvíme u kapalných izolantů o emulzi. Pokud je disperzní fáze tvořena pevnou látkou a disperzní prostředí kapalinou. Hovoříme o suspenzi. Elektroforetickou konduktivitu můžeme vyjádřit jako:

$$\gamma_k = \frac{n_k \cdot r \cdot \xi^2 \cdot \varepsilon^2}{6 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (2.8)$$

kde r je poloměr kulovitých koloidních částic, ξ je elektrokinetický potenciál (v rozmezí od 0,05 V do 0,07 V), ε je permitivita kapalného izolantu, η je dynamická viskozita [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$].

Z výše uvedeného vyplývá, že konduktivita kapalných izolantů značně závisí na teplotě T , dynamické viskozitě η a na struktuře. Jako kapalně izolanty lze použít pouze kapaliny vzniklé kovalentními vazbami v molekulách, nevykazující příliš velký dipólový

⁶ Jedná se o označení pro disperzní soustavu obsahující částice, které svou velikostí spadají do rozmezí 1 nm až 1000 nm (případně 500 nm). Nebo se jedná o látku, která tvoří heterogenní disperzní soustavu obsahující částice o velikosti výše zmíněné. Zavedení pojmu koloid souvisí s tím, že částice v tomto rozmezí udělují danému systému specifické vlastnosti, které se v mnoha ohledech nevyskytují u částic s velikostí pod 1 nm (tzv. analytická disperze) a částic nad 1000 nm, event. 500 nm, (hrubá disperze).

moment. To jsou nepolární, polární a silně polární kapalně izolanty. Kapaliny s iontovými a kovovými vazbami již patří do skupiny vodičů.

2.1.1.3 Elektrická vodivost pevných izolantů

Pevné izolanty mají obecně za normálních podmínek (za působení slabého elektrického pole a nevysokých teplot) velmi malou hodnotu konduktivity. Ta je závislá na složitosti a pestrosti struktury pevného izolantu, které dělíme na iontové amorfní a iontové krystalické. Elektrická vodivost v pevných izolantech může být elektronová nebo také iontová s jedním z těchto typů převládajícím. U pevných izolantů v praxi používaných převládá iontová elektrická vodivost. Výklad elektrické vodivosti u pevných izolantů je poněkud složitější než u kapalných a plynných izolantů. Musíme vycházet z určitých zjednodušujících předpokladů o pohybu iontů. Můžeme pak pro určení konduktivity použít stejných vztahů (2.5) a (2.6).

Krystalické látky jsou tvořeny kladnými a zápornými ionty přirozeně pevně držených v uzlech mřížky. K elektrické vodivosti může dojít pouze vzájemnou výměnou kladných a záporných iontů za podmínky dodání velkého množství energie. Reálně se v krystalech vyskytují poruchy, na základě kterých vykazují určitou měřitelnou elektrickou vodivost. Dle Frenkeliho teorie ionty občas při jejich tepelných kmitech přeskočí z uzlu mřížky do meziuzlového prostoru, tzv. intersticiální polohy. To má za následek vznik právě jednoho volného místa ve struktuře tzv. vakance. Tento druh poruchy nazýváme Frenkelova porucha. Schottkyho poruchou nazýváme stav, kdy se v mřížce krystalu nachází stejný počet volných míst po kladných a záporných iontech a přemístily se na povrch, kde vytvořily novou vrstvu krystalu.

Zástupcem anorganických amorfních látek jsou různé druhy skel. Jejich elektrické, ale také mechanické vlastnosti jsou převážně ovlivňovány různými druhy příměsí. Elektrická vodivost různých druhů skel se pohybuje v rozmezí od $10^{-3} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ do $10^{-17} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Nejmenší elektrickou vodivost vykazují čistá křemičitá skla. Elektrická vodivost skel je tvořena pohybem slabě vázaných iontů způsobeným působením slabého elektrického pole. Podobně je tomu u kapalných izolantů. Pro vyjádření konduktivity pevných anorganických amorfních látek lze použít vztah 2.7. Pod skupinu organických amorfních látek patří syntetické

nebo přírodní makromolekulární látky. I zde hrají hlavní roli ve velikosti konduktivity hlavní roli nečistoty a příměsi. V neposlední řadě, tak jako u všech materiálů, má na vodivost vliv také teplota dané látky.

Doposud jsme elektrickou vodivostí rozuměli vodivost vnitřní, neboli tzv. objemovou. U pevných izolantů se ale můžeme setkat i s povrchovou elektrickou vodivostí. Měrná povrchová elektrická vodivost je vyjádřena vztahem:

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E} \quad (2.9)$$

kde I_p je proud tekoucí po povrchu izolantu a E je intenzita elektrického pole.[1, 3, 7]

2.1.2 Dielektrická polarizace

Dielektrická polarizace je vlastnost dielektrik projevující se po vložení do elektrického pole. Na jejím základě rozdělujeme dielektrické látky na polární a nepolární. Působením vnějšího i vnitřního elektrického pole se přesouvají elektricky vázané náboje dielektrika na malé vzdálenosti ze svých rovnovážných poloh a dochází ke vzniku dipólových momentů. Jsou-li v látce obsaženy vlastní dipólové momenty, jedná se o polární materiály. Střed jejich kladného a záporného náboje není v jednom místě a tyto dipóly se natáčejí ve směru působení elektrického pole. U nepolárních látek není vlastní dipólový moment. Střed kladného a záporného náboje je v jednom místě a po vložení do elektrického pole dochází k deformaci molekul ve směru intenzity elektrického pole. Stav takto polarizovaného dielektrika popisujeme vektorem polarizace daným jako souhrnný dipólový moment orientovaný elektrickým polem vztažený na objemovou jednotku pole:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (2.10)$$

kde \vec{P} je vektor polarizace, $\Delta \vec{M}$ je dipólový moment objemového elementu ΔV a ΔV je objem elementu izolantu.

Polarizace způsobené vlivem elektrického pole rozdělujeme dle nosičů náboje podílejících se na mechanismu polarizace. Vznikne-li polarizace posunem silně vázaných nosičů elektrického náboje, jedná se o deformační polarizaci. Naopak, podílejí-li se na polarizaci slabě vázané nosiče náboje, jedná se o relaxační polarizaci.

Deformační polarizace jsou bezztrátové vzhledem k pevnosti vazby nosičů náboje. Tím může docházet pouze k posunu na krátké vzdálenosti. Nedojde-li k rozrušení látky, tak nejsou závislé na tepelném pohybu částic, tlaku ani frekvenci. Tyto látky se také vyznačují rychlým ustálením polarizace a navrácením nosičů do původních poloh. Skupinu deformační polarizace tvoří polarizace elektronová, iontová a polarizace pružně vázaných dipólových momentů.

Elektronová polarizace. Po vložení dielektrika do elektrického pole dojde k působení elektrostatických sil na kladný náboj jádra a záporný náboj elektronu v opačném směru. Posunutím těžišť nábojů získá atom v dielektriku indukovaný dipólový moment. K tomuto druhu polarizace dochází vždy u všech látek a ve všech skupenstvích. Je tepelně nezávislá a energeticky bezztrátová a doba ustálení polarizace je rovna hodnotě 10^{-15} s.

Iontová polarizace. Klíčovou roli v tomto druhu polarizace hrají ionty. Ty jsou silně vázány v krystalové mřížce iontovou vazbou. Rozdíl od elektronové polarizace je v přítomnosti určitých dipólových momentů bez přiložení vnějšího elektrického pole. Jeho působením dochází pouze k pružnému posunutí iontů a tím ke změně velikosti a směru dipólových momentů. Doba ustálení polarizace je delší ($10^{-13} \div 10^{-12}$ s). Opět se jedná o bezztrátovou a frekvenčně nezávislou polarizaci

Polarizace pružně vázaných dipólových momentů. Vyskytuje se u pevných látek s pružnými vazbami molekul. Tyto vazby jsou tak silné, že dochází pouze k malým posuvům. Po vložení do vnějšího elektrického pole dojde opět ke změně velikosti a orientaci dipólových momentů. Podstatou je podobná iontové polarizaci.

Relaxační polarizace je značně odlišná od deformační. Liší se především dobou průběhu, formou a teplotní závislostí. Relaxační polarizace je na rozdíl od deformační ztrátová. Bez přítomnosti elektrického pole je tepelný pohyb nosičů náboje chaotický a pravděpodobnost polohy a rozložení elektrického náboje je tak ve všech místech látky stejná. Přiložíme-li elektrické pole, změníme rozložení potenciálových bariér nosičů náboje v materiálu a některá místa se tak stanou energeticky výhodnějšími. Tím dojde ke vzniku

dipólového momentu a tím k relaxační polarizaci. Tu rozdělujeme na iontovou relaxační polarizaci a dipólovou relaxační polarizaci.

Iontová relaxační polarizace se vyskytuje v látkách složených z iontů nebo molekul, obsahující volné ionty příměsí a nečistot slabě vázaných ve skladbě k sousedním částicím. Tyto látky jsou většinou amorfni jako například anorganická skla či keramické látky s obsahem skloviny a jsou velmi citlivé na vnější elektrické pole. Tento druh polarizace lze popsat matematickým modelem dvojité potenciálové jámy. Předpokládá se, že nosiče náboje obou polarit mohou zaujímat dvě různé, ale energeticky rovnocenné polohy. Nepůsobí-li vnější elektrické pole, je hloubka obou potenciálových jam stejná, nosiče nábojů překonávají potenciálovou bariéru díky tepelnému pohybu a k těmto přechodům dochází se stejnou pravděpodobností. Látka tedy není polarizována. Začne-li působit vnější elektrické pole, dojde ke značné změně. Hloubky jednotlivých potenciálových jam se změní a částice začnou potenciálovou bariéru překonávat v místech s nejnižší energetickou náročností. Dojde k nerovnoměrnému rozložení náboje, vzniku dipólového momentu a tím k polarizaci. Tato polarizace je frekvenčně a teplotně závislá.

Dipólová relaxační polarizace se vyskytuje v polárních látkách, které mají dipólové molekuly vázané tak slabě, že se vlivem působení elektrického pole velmi snadno natáčejí ve směru siločar. Tomuto natáčení brání tepelný pohyb částic, proto je tento druh polarizace velmi silně teplotně závislý a také ztrátový stejně jako předešlý druh.

U výše uvedených druhů polarizace dielektrik se na polarizaci podílely vázané nosiče náboje. Na procesu se ale mohou podílet také volné nosiče elektrického náboje, což pokládáme za polarizaci migrační, případně za polarizaci vznikající prostorovým nábojem. Podmínkou pro vznik prostorového náboje je ale přítomnost určitých nehomogenit v dielektriku. Jsou to například nečistoty, bublinky, vakuoly, praskliny a podobné strukturální poruchy.[1,3]

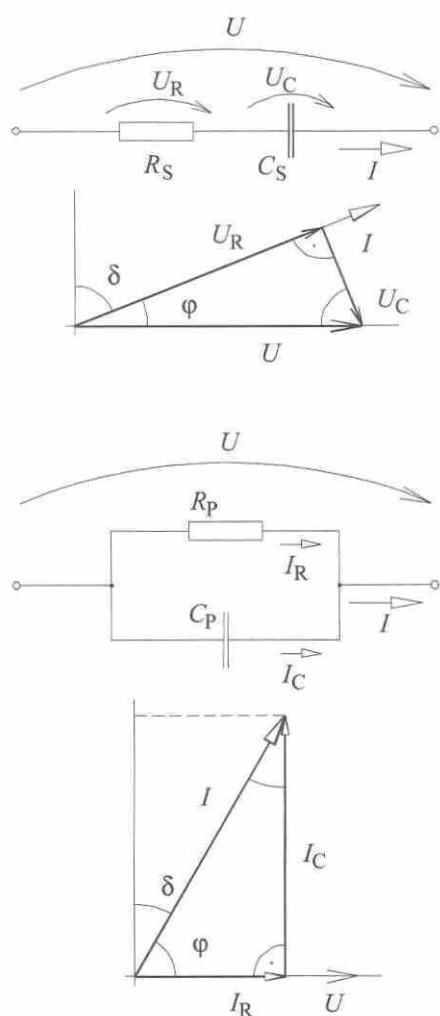
2.1.3 Dielektrické ztráty v izolantech

Při zatížení dielektrického materiálu působením elektrické energie je pro tyto materiály rozhodující, kolik energie se díky vnitřním dějům v jeho objemu za jednotku času přemění na tepelnou energii. Takto přeměněnou energii nazýváme dielektrickými ztrátami.

Z toho vyplývá, že materiál (izolant) se zahřívá, což je v elektrotechnice až na výjimky nežádoucí. Takto vzniklou tepelnou energii je třeba odvádět do okolí, aby nedocházelo k místnímu přehřátí. To by mohlo způsobit další nárůst dielektrických ztrát a tím další zvýšení teploty izolantu, což může vést až k tepelnému průrazu a destrukci izolantu. Se vznikem ztrát a ztrátou energie v dielektriku souvisí vlastní elektrická vodivost izolantů a některé druhy ztrátových polarizací. Ke vzniku dielektrických ztrát může docházet také působením elektrických výbojů (částečných výbojů) v nerovnoměrně rozloženém dielektriku. Jsou to výboje vyskytující se pouze ve zlomku délky elektrod, které mají degradační účinky na prostředí, v němž vznikají. Jedná se pak o ztráty ionizační, za určitých podmínek také ztráty částečnými výboji. Dielektrické ztráty mohou vznikat vlivem působení stejnosměrného i střídavého napětí nezávisle na tvaru průběhu napěťové křivky. Dielektrické ztráty jsou závislé na teplotě. V případě působení stejnosměrného proudu vznikají v dielektriku Jouleovy ztráty úměrně závislé na velikosti proudu a elektrického odporu izolantu. Takovýto ztrátový výkon můžeme popsat vztahem:

$$P_{z_{ss}} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i} \quad (2.11)$$

kde R_i [Ω] je izolační odpor dielektrika, U je napětí přiložené na vzorek a I je hodnota ustáleného proudu procházející dielektrikem. Ztráty způsobené střídavým elektrickým polem jsou větší a ovlivněny jak Jouleovými ztrátami, tak i ionizačními ztrátami a polarizací.



Obr. 2.3 Sériový a paralelní náhradní obvod, převzato z [1]

Ztráty v dielektriku a chování dielektrika ve střídavém elektrickém poli můžeme popsat tzv. ekvivalentními náhradními obvody uvedené na obrázku 2.3. Obvody jsou tvořeny buď sériovým, nebo paralelním zapojením kondenzátoru a ideálního bezztrátového dielektrika. Fázový posun δ se nazývá ztrátový úhel a jeho tangentu nazýváme ztrátový činitel. Izolanty mající za pokojové teploty hodnoty ztrátového činitele $\text{tg} \delta > 10^{-2}$ se považují za kvalitní. Z obrázku můžeme pro sériový náhradní obvod vyjádřit ztrátový činitel jako:

$$\text{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} \quad (2.12)$$

a pro ztrátový výkon v sériovém náhradním obvodu platí:

$$P_z = \frac{\omega \cdot C_s \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (2.13)$$

Pro paralelní ekvivalentní náhradní obvod ztrátový činitel vyjádříme jako:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (2.14)$$

a ztrátový výkon ekvivalentního náhradního obvodu je daný vztahem:

$$P_z = \omega \cdot C_s \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (2.15)$$

2.1.3.1 Dielektrické ztráty v plynných izolantech

Dielektrické ztráty plynných izolantů jsou převážně způsobeny jejich nepatrnou elektrickou vodivostí, jelikož polarizační ztráty jsou téměř nulové. Ztrátový činitel se pohybuje při frekvenci 50 Hz v řádech 10^{-8} . Ztrátový činitel je v plynných izolantech frekvenčně závislý a hyperbolicky klesá se zvyšováním frekvence:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0} \quad (2.16)$$

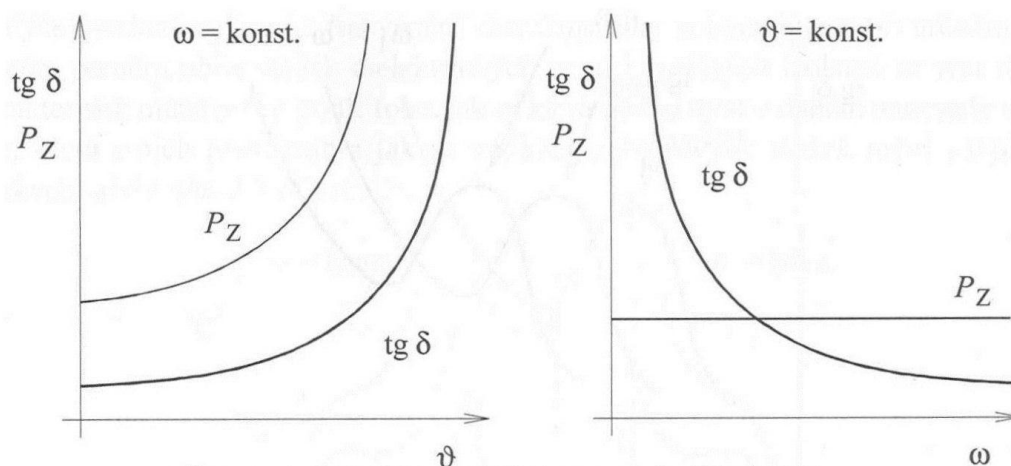
kde γ je frekvenčně nezávislá konduktivita plynu. Ztrátový činitel plynných izolantů je také teplotně závislý a daný teplotní závislostí konduktivity a relativní permitivity. Plynné izolanty se používají v těch případech, kdy jsme omezeni malým prostorem nebo jako dielektrika bezztrátových vysokonapěťových a vysokofrekvenčních kondenzátorů pro normální kapacit při různých měřeních. Příkladem může být Scheringův vysokonapěťový můstek [1].

2.1.3.2 Dielektrické ztráty v kapalných izolantech

Dielektrické ztráty v kapalných izolantech závisejí na druhu polarizace daného dielektrika. Tedy na tom, jedná-li se o kapalný izolant polární (dipólového charakteru),

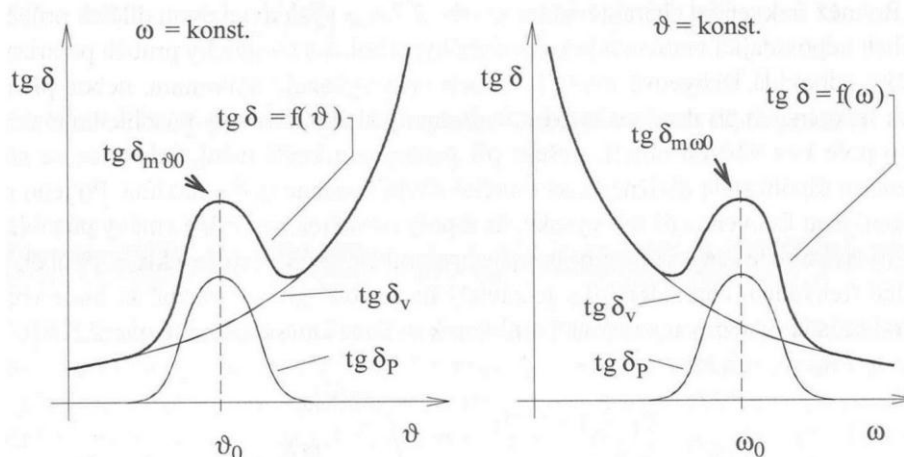
nebo nepolární elektricky neutrální a samozřejmě na obsahu příměsí a nečistot daného materiálu. Dielektrické ztráty v kapalných izolantech jsou samozřejmě závislé na teplotě, frekvenci a intenzitě působícího elektrického pole.

V čistějších nepolárních kapalných izolantech se projevuje jen elektronová polarizace, která je v oblasti používaných frekvencí bezeztrátová. Z toho vyplývá, že ztráty v těchto izolantech jsou způsobené pouze elektrickou vodivostí těchto materiálů. Elektrická vodivost u čistých nepolárních kapalných izolantů je zanedbatelná, tudíž i dielektrické ztráty jsou malé (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Teplotní a frekvenční charakteristika $\text{tg } \delta$ a P_Z nepolárních kapalných izolantů, převzato z [1]

U polárních kapalných izolantů musíme kromě ztrát způsobených elektrickou vodivostí uvažovat i ztráty polarizační. Polární kapalně izolanty proto vykazují větší dielektrické ztráty než nepolární a přítomnost dipólů v jejich struktuře vede ke zvýšení vodivostních ztrát a tím k celkovému navýšení (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Teplotní a frekvenční charakteristika $\text{tg } \delta$ polárních kapalných izolantů, převzato z [1]

2.1.3.3 Dielektrické ztráty v pevných izolantech

V pevných izolantech jsou dielektrické ztráty způsobeny ztrátami vodivostními, polarizačními a ionizačními. Jejich podíl na celkových ztrátách pak závisí na struktuře daného materiálu, chemickém složení a přítomnosti nečistot.

Nepolární pevné izolanty obsahují pouze bezztrátové pružné polarizace. Dielektrické ztráty jsou proto malé, protože se v těchto materiálech uplatňují jen vodivostní ztráty. Pro výborné elektroizolační vlastnosti nepolárních pevných izolantů se používají pro vysokofrekvenční aplikace. Závislost $\text{tg } \delta$ na teplotě a frekvenci působícího elektrického pole je téměř totožná s příslušnou závislostí nepolárních kapalných izolantů.

Iontové pevné izolanty jsou tvořeny pevnými anorganickými látkami. Dielektrické ztráty v nich jsou určeny těsností uložení částic ve struktuře materiálu. V *iontových pevných izolantech s těsným uložením iontů* jsou projeveny převážně polarizace pružné bezztrátové, zatímco relaxační polarizace se na dielektrických ztrátách téměř neprojevují. Ve střídavém elektrickém poli se tyto izolanty chovají téměř jako látky nepolární. Dielektrické ztráty jsou proto převážně ztrátami vodivostními, způsobené nečistotami a poruchami krystalové mřížky, a jsou teplotně a frekvenčně závislé. *Iontové pevné izolanty s netěsným uložením iontů* mají kromě pružných polarizací i iontovou tepelnou polarizaci. Dielektrické ztráty jsou jak vodivostního, tak polarizačního charakteru.

Iontové amorfnní pevné izolanty mají dielektrické ztráty způsobené jak vodivostní, tak polarizační složkou. Obsahu příměsí, chemického složení, poruch a nečistot ve struktuře

materiálu způsobuje v různých látkách této skupiny různé poměry velikostí jednotlivých složek ztrát. To se odráží na různých varech teplotních a frekvenčních charakteristik $\tan \delta$.

Polární pevné izolanty jsou tvořeny makromolekulárními látkami. Patří k nejpoužívanějším materiálům používaných v elektrotechnice. Dielektrické ztráty jsou opět tvořeny dvěma složkami. Vodivostní a polarizační. Za určitých podmínek se mohou projevit také ionizační ztráty a to v dutinkách vyplněných plynem.

2.1.3.4 Dielektrické ztráty homogenních a nehomogenních izolantů

Doposud jsme uvažovali o dielektrických ztrátách v homogenních pevných izolantech. V praxi se ale většina materiálů používá ve formě nehomogenní. Takové vznikají při výrobě, zpracování a při zatěžování během užívání těchto izolantů. Mnoho materiálů je ale nehomogenních již z principu daného materiálu jako například vrstvené kompozitní izolanty. Tyto nehomogenity na sobě mohou vytvářet prostorové náboje, což vede ke ztrátě energie a ke značnému zvýšení dielektrických ztrát. Jedná-li se pak o nehomogenity způsobené dutinami vyplněné plynem, pak se projevují i ztráty ionizační vlivem částečných výbojů [1].

2.1.4 Permittivita

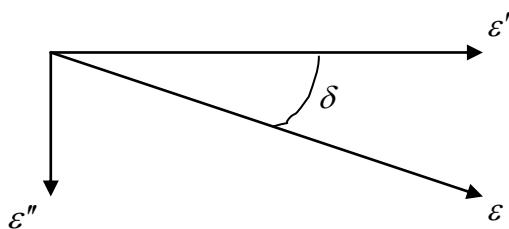
Komplexní permitivita ε je pojem, který se používá k popsání polarizačních jevů. Je-li dielektrikum vystaveno působení vnějšího elektrického pole o konstantní intenzitě E , dojde ke zvýšení elektrické indukce D vlivem polarizačních jevů. K navýšení elektrické indukce dojde o hodnotu vektoru P oproti elektrické indukci ve vakuu D_0 .

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} \quad (2.17)$$

Komplexní permitivita je frekvenčně závislá a charakterizuje vlastnosti dielektrik ve střídavém elektrickém poli. Lze ji obecně popsat jako:

$$\varepsilon(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (2.18)$$

kde ε' je reálná složka komplexní permitivity a vyjadřuje vlastní relativní permitivitu a ε'' je imaginární část, a vyjadřuje ztráty v dielektriku po vložení do elektrického střídavého pole.



Obr. 2.6 Grafické znázornění komplexní permitivity

Z obrázku 2.6 můžeme odvodit vztah pro určení velikosti úhlu δ , který udává zpoždění vektoru elektrické indukce za vektorem intenzity elektrického pole.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2.19)$$

Relativní permitivita je veličina charakterizující chování izolantů v elektrickém poli, tedy především jejich schopnost se polarizovat. Je daná jako poměr kapacity kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem a s vakuem, tedy $\varepsilon_r = C / C_0$ [3]. Výhoda relativní permitivity oproti polarizovatelnosti je v její měřitelnosti. Lze ji zapsat vztahem:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \cdot (1 + \kappa) \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (2.20)$$

kde \vec{D} je elektrická indukce, \vec{E} je intenzita elektrického pole, κ dielektrická susceptibilita, ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$) ε_r je relativní permitivita [1,3].

2.1.5 Elektrická pevnost izolantů

Elektroizolační materiály mají základní funkci elektricky oddělit dvě místa s rozdílným elektrickým potenciálem. To můžeme charakterizovat vlastností nazývanou se elektrická pevnost. Pomocí tohoto ukazatele můžeme spolehlivě dimenzovat konstrukci a parametry elektrotechnického zařízení. Ačkoli izolační materiály mají primární funkci zabránit průchodu elektrického proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem, důležitou roli ve schopnosti splnění tohoto požadavku hrají okolní podmínky a velikost přiloženého působícího elektrického pole na daný vzorek. Dojde-li k překročení lokální

intenzity elektrického pole (kritické úrovně elektrického napětí), prudce naroste počet volných nosičů elektrického náboje i jejich pohyblivost. Tím prudce klesne rezistivita daného materiálu a dojde ke ztrátě jeho izolační schopnosti. Následně pak může dojít dočasně k přeskoku nebo trvale k průrazu a k výrazné degradaci elektroizolačního materiálu. Při tomto jevu může docházet k hoření elektrického oblouku doprovázeným vysokými teplotami, ionizačními procesy a intenzivním zářením.

Elektrickému napětí, při kterém k tomuto jevu dochází, říkáme *průrazné napětí*. Pro hodnocení materiálů zavedeme elektrickou pevnost izolantů E_p [$V \cdot m^{-1}$] jako podíl průrazného napětí k tloušťce daného materiálu v místě průrazu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (2.20)$$

kde U_p je průrazné napětí [V] a d tloušťka materiálu [m].

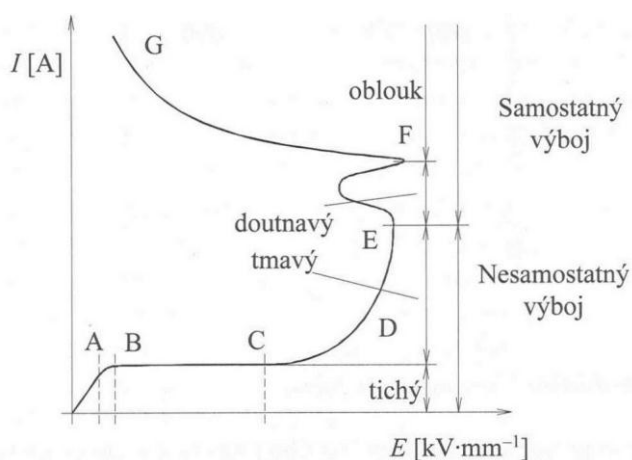
V případě homogenního elektrického pole je elektrická pevnost daná jako intenzita působícího elektrického pole, při níž dojde k průrazu izolačního materiálu. U nehomogenních elektrických polí jde ale o parametr, který můžeme porovnávat mezi jednotlivými materiály a měřeními pouze v případě dodržení shodného způsobu měření. Elektrická pevnost materiálů je značně závislá na tloušťce materiálu, jeho struktuře, homogenitě, obsahu nečistot, vlhkosti, tvaru působícího elektrického pole a jeho frekvenci, na teplotě materiálu a jeho okolí. Z uvedeného je patrné, že parametr elektrické pevnosti materiálů v nehomogenním poli je dohodnutou veličinou.

Elektrická pevnost materiálů závisí také na druhu a délce působení elektrického pole. To může být střídavé, impulsní a stejnosměrné. Při hodnocení střídavé elektrické pevnosti provádíme měření převážně při frekvenci zkušebního napětí 50 Hz. Impulsní elektrickou pevnost zkoumáme přiložením rázového napětí o tvaru rázové vlny 1,2/50. Tedy doba čela vlny 1,2 μs a 50 μs je doba do poklesu napětí na poloviční hodnotu. Stejnosměrná elektrická pevnost bývá obvykle větší než střídavá, někdy až dvojnásobná.

2.1.5.1 Elektrická pevnost plyných izolantů

Na obrázku 2.7 je znázorněna voltampérová charakteristika plyného izolantu. Oblast 0–A je částí platnosti Ohmova zákona a A–B je přechodová oblast voltampérové charakteristiky mezi sousedními oblastmi. Oblast B–C znázorňuje oblast nasyceného proudu.

To znamená, že proud tekoucí vzduchem v této oblasti není závislý na přiloženém elektrickém napětí. Ve vzduchu za normálních podmínek je nasycený proud pozorovatelný v rozsahu intenzit elektrického pole od $0,7 \cdot 10^{-6}$ do $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. Překročí-li intenzita elektrického pole ve vzduchu kritickou hodnotu znázorněnou bodem C ($E_k=1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$), začne probíhat nárazová ionizace. Poté se pohybujeme v oblasti C-E odpovídající nesamostatnému výboji nebo E-G výboji samostatnému. Oblast nesamostatného výboje někdy také označujeme jako oblast Townsendovo výbojů. Nesamostatný výboj potřebuje pro svůj vznik vnější ionizační činitele, jako jsou například zdroje záření nebo zdroj elektronů a bez jejich příspěvku nesamostatný výboj zaniká. Samostatné výboje vznikají pouze za působení zdroje elektrického napětí, které vytvoří volné nosiče náboje a uvede je do pohybu. Do oblasti samostatného výboje přejde nesamostatný výboj po překročení určité meze intenzity vnějšího elektrického pole. Poté se stává výboj samostatným a udrží se i bez příspěvku vnějších ionizačních činitelů. V plynném izolantu je tento jev doprovázen přeskokem a elektrické napětí, při kterém dojde k samostatnému výboji, nazýváme počátečním napětím výboje [1].



Obr. 2.7 VA charakteristika plynného izolantu, převzato z [1]

2.1.5.2 Elektrická pevnost kapalných izolantů

Kapalné izolanty mají vyšší elektrickou pevnost než plynné izolanty, jsou ale citlivější na čistotu. Nečistoty mohou vést ke značnému snížení elektrické pevnosti kapalných izolantů a mohou v nich být rozpuštěné, nebo v tzv. koloidní podobě. Tyto koloidní částice ovlivňují elektrickou pevnost více, než rozpuštěné nečistoty. Můžeme sem zařadit zejména kapičky vody, bublinky vzduchu nebo pevné částice. Zásadní postavení z hlediska elektrické pevnosti má v kapalných izolantech právě přítomnost vody.

Elektrická pevnost kapalných izolantů závisí na mnoho náhodných a téměř nekontrolovatelných parametrů. Jsou to zejména přítomnost a druh příměsí jako voda a rozpuštěné plyny, stupeň znečištění elektrod a jejich tvar a rozložení elektrického pole mezi nimi, materiál elektrod, doba působení elektrického napětí a jeho tvarový průběh, hydrostatický tlak, parciální tlak plynů obsažených v kapalných izolantech, teplota a jiné. Z těchto příčin ovlivňujících parametr elektrické pevnosti je dosud obtížné pevně stanovit chování kapalného izolantu při přeskočení elektrické energie. Dosud bylo vytvořeno několik teorií, popisujících mechanismus přeskočení v čistých kapalných izolantech. Tyto teorie (hypotézy) můžeme rozdělit do dvou skupin. První z nich je skupina, kde přeskok v kapalných izolantech způsobuje zejména emise elektronů z elektrod a nárazová ionizace (např. plynová hypotéza stanovená A. Gemantem). Druhou skupinu pak tvoří hypotézy, kde je rozhodujícím faktorem tvorba vzduchových bublinek (např. hypotéza emise a nárazové ionizace sepsaná Goodwinem Mac Faydenem).

Elektrické výboje a s nimi spojená elektrická pevnost kapalných izolantů je spojena s několika charakteristickými rysy [1,3]:

- elektrická pevnost kapalných izolantů je vyšší než u plyných izolantů
- různý charakter mechanismu přeskočení
- hodnota přeskokového elektrického napětí může být ovlivněna materiálem a povrchovou úpravou elektrod
- počátek tvorby elektrického výboje je zpravidla v místech s vyšší koncentrací nečistot

Při přeskočení elektrické energie v kapalném izolantu a průrazu izolační vrstvy není toto poškození izolace trvalé. Kapalným izolantem má po odpojení elektrického napětí schopnost regenerace v místě průrazu.

2.1.5.3 Elektrická pevnost pevných izolantů

Zásadní rozdíl mezi pevnými, kapalnými a plynými izolanty z hlediska elektrické pevnosti je v trvalém účinku elektrického průrazu ve struktuře materiálu u pevných izolačních materiálů. Tím samozřejmě dojde ke ztrátě izolační schopnosti a k trvalému propálení elektricky vodivé cesty mezi elektrodami. Jevy způsobující elektrický průraz pevného izolačního materiálu dělíme z hlediska průběhu a charakteru do tří skupin.

Čistě elektrický průraz není závislý na velikosti průrazného napětí, na teplotě ani na délce působení přiloženého napětí. Energie elektrického pole způsobí okamžitě

svou velikostí destruktivní průraz v nejslabším místě zkoumaného vzorku a je ovlivňována homogenitou elektrického pole, chemickým složením a strukturou materiálu. Elektrická pevnost klesá s rostoucí frekvencí přiloženého napětí. K tomuto druhu průrazu dochází v případech, kdy jsou vyloučeny degradační účinky izolačního materiálu vlivem působení zvýšené teploty a elektrického pole.

Tepelný průraz vznikne v izolačních materiálech vlivem dielektrických či Jouleových ztrát, případně jejich kombinací. Tím dojde v materiálu k tepelně elektrické nerovnováze. Teplo vzniklé v izolačním materiálu se nestačí odvést do okolí a způsobí jeho destrukci. Tepelný průraz vykazuje silnou závislost průrazného napětí na teplotě a délce působení přiloženého napětí.

Elektrochemický průraz se projevuje v případech, kdy na izolační materiál působí elektrické pole delší dobu. Ve struktuře izolantu pak dochází k elektrochemickým procesům majících za následek snížení elektrické pevnosti daného materiálu[1,3].

2.2 Mechanické vlastnosti izolantů

Při výrobě a následném provozu elektrických zařízení jsou použité izolační materiály namáhány kromě působení elektrické energie i ostatními vlivy. Z nich nejzásadnější je vliv mechanického namáhání izolačních materiálů. Tím může docházet k různým deformacím izolačního systému, vzniku mechanického napětí na izolaci a následně i ke zhoršení elektrických izolačních vlastností. Jedná se například o vlivy při výrobě vinutí (ovíjení izolační páskou, vkládání vinutí do drážek atd.) a při provozu zařízení například o síly vyvozené dilatací při změnách teploty vinutí, o mechanické rázy vyvozené zkratovými proudy, namáhání vibracemi atd.[1]. Nejčastěji sledované mechanické vlastnosti izolačních materiálů jsou mez pevnosti v tahu, pevnosti v ohybu a rázová houževnatost. Zkoušení materiálů na tyto vlastnosti provádíme dle příslušných platných norem pro izolační materiály. Dále u izolantů můžeme zkoumat nasákavost, navlhavost, tvrdost, hustotu, smrštění a další.

2.2.1 Tahové vlastnosti izolantů

Tahové vlastnosti izolantů určujeme dle normy ČSN ISO 527 „Plasty – Stanovení tahových vlastností.“. Tahové zkoušky se provádějí na zkušebních strojích, které se využívají i na zkoušky ohybových vlastností. Stroj musí umět vyvíjet rychlost zkoušky tahem a ohybem

dle výše uvedené normy s určitou tolerancí. Čelisti pro upnutí materiálu musí umožnit osové umístění a namáhání vzorku, materiál z nich nesmí vyklouzávat a nesmí způsobovat předčasné lámání materiálu. Siloměr a průtahoměr musí vyloučit vliv setrvačností způsobené zkušební rychlostí a musí mít přesnost maximálně 1% z měřené hodnoty. Zkoušené vzorky musí být kondicionovány ve standardních podmínkách (23 ± 2 °C a 50 ± 5 % relativní vlhkosti) minimálně 24 hodin a počet zkoušených vzorků by měl být minimálně 5 kusů.

Mez pevnosti v tahu označujeme σ_M [MPa] a definujeme jí jako maximální napětí v tahu působící na zkušební těleso během zkoušky.

Napětí v tahu σ [MPa] je definováno jako působící síla vztažená na jednotku plochy a je dáno vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.21)$$

kde F je příslušná naměřená hodnota síly [N] a A je plocha počátečního příčného řezu zkušební tělesa [mm^2].

Poměrné prodloužení ε [%] určíme z počáteční naměřené délky:

$$\varepsilon = \frac{100 \cdot \Delta l_0}{l_0} \quad (2.22)$$

kde l_0 je počáteční měřená délka zkušební tělesa [mm] a Δl_0 zvětšení délky zkušební tělesa [mm].

Jmenovité poměrné prodloužení ε_t [%] určíme na základě počáteční vzdálenosti mezi čelistmi.

$$\varepsilon_t = \frac{100 \cdot \Delta l_0}{l_0} \quad (2.23)$$

kde l_0 je počáteční vzdálenost mezi čelistmi [mm] a Δl_0 zvětšení vzdálenosti mezi čelistmi [mm].

Modul pružnosti v tahu E_t [MPa] určíme ze dvou hodnot poměrného prodloužení:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2.24)$$

kde σ_1 je napětí [MPa] při hodnotě $\varepsilon_1 = 0,0005$ a σ_2 je napětí [MPa] při hodnotě $\varepsilon_2 = 0,0025$.

Poissonův poměr μ_n [-] je poměrné zúžení ε_n v jednom ze dvou normálových rozměrů kolmých k ose protažení v počáteční pracovní části zkušebního tělesa k odpovídajícímu poměrnému prodloužení ε ve směru protažení.

$$\mu_n = -\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} \quad (2.25)$$

kde ε je poměrné prodloužení, ε_n je deformace v normálovém směru a $n = b$ je šířka nebo $n = h$ je tloušťka materiálu.

2.2.2 Ohybové vlastnosti izolanů

Ohybové vlastnosti izolanů se zkoumají dle příslušné normy ČSN EN ISO 178 „Plasty – Stanovení ohybových vlastností“ a některé další detaily jsou blíže specifikovány v podružných souborech ISO. Působení normovaného trnu konstantní rychlostí a silou F na daný materiál uprostřed rozpětí podpěr podepřeného na okrajích jako nosník je podstatou ohybové zkoušky. Tyto zkoušky probíhají za použití stejného stroje a postupu, jako v kapitole 2.2.1 tahové vlastnosti izolanů.

Pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa] je definována jako maximální napětí v ohybu, které ještě vydrží zkoušený vzorek bez strukturálního poškození.

Deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu ε_{fM} [%] je deformace způsobená ohybem při maximálním napětí v ohybu.

Napětí v ohybu σ_f [MPa] je dáno vztahem:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.26)$$

kde F je použitá síla [N], L je rozpětí podpěr [mm], b je šířka [mm] a h tloušťka [mm] zkoušenice.

Deformace ohybem ε_f [%] je popsána jako:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot 100 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (2.27)$$

kde s je průhyb materiálu [mm], h je tloušťka zkoušeného vzorku [mm] a L rozpětí podpěr [mm].

Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa] je popsán vztahem:

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (2.28)$$

kde hodnota σ_{f1} je rovna napětí v ohybu naměřené při průhybu s_1 a hodnota σ_{f2} je rovna napětí v ohybu naměřené při průhybu s_2 a ε_{f1} je odpovídající deformace ohybem při průhybu s_1 a ε_{f2} je odpovídající deformace ohybem při průhybu s_2 .

Pokud je potřeba změřit ohybové vlastnosti např. kompozitního materiálu, který obsahuje velmi hrubé plnivo, musíme použít vzorek materiálu se šířkou minimálně 30mm. V situaci, kdy můžeme předpokládat, že vlastnosti materiálu budou různé v závislosti na orientaci vorku vzhledem na rozměry desky izolačního materiálu, je potřeba odebrat více vzorků z různých míst a s různou orientací.

2.2.3 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost je vlastnost, která poměrně dobře popisuje mechanické dynamické namáhání izolačních materiálů. Parametry této vlastnosti stanovujeme pomocí speciálního zařízení zvaného Charpyho padostroj. To je kyvadlové kladivo, které je schopno měřit rázovou energii W spotřebovanou k přeražení zkoušenice. Výsledkem zkoušky je přeražení materiálu (zkušební tělesa) položeného vodorovně na podpěrách úderem rázového kladiva. Zkušební těleso musí splňovat dané rozměry dle typu a velikosti materiálu a musí být na podpěrách správně orientováno s ohledem na případné vrstvení nebo vyztužení izolačního

materiálu. Vzorek můžeme na protější straně dopadu kladiva opatřit normovaným vrubem. Rozlišujeme 2 druhy rázové houževnatosti.

Rázová houževnatost Charpy zkušebního tělesa bez vrubu a_{cU} [kJ·m⁻²]. Je dána jako rázová energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa bez vrubu vztažená na původní průřez zkušebního tělesa. Tu vypočteme pomocí vztahu:

$$a_{cU} = \frac{W}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (2.29)$$

kde W je energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa [J], h je tloušťka a b šířka zkušebního tělesa [mm].

Rázová houževnatost Charpy zkušebního tělesa opatřeného vrubem a_{cN} [kJ·m⁻²]. Je stanovena jako rázová energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa opatřeného vrubem vztažená na původní průřez zkušebního tělesa pod vrubem. Vypočteme ji pomocí vztahu:

$$a_{cN} = \frac{W}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \quad (2.30)$$

kde W je energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa [J], h je tloušťka zkušebního tělesa [mm] a b_N šířka zkušebního tělesa pod vrubem [mm] [1,3].

2.3 Tepelné vlastnosti izolantů

Při provozu elektrického zařízení dochází vlivem ztrát k jeho celkovému oteplení a tím také ke zvýšení teploty v izolačním systému. Ten je jednou z nejdůležitějších součástí zařízení a bez jeho správné funkce by nebylo možné elektrické zařízení provozovat. Je tedy nutné, aby používané izolační materiály vyhověly všem elektrickým, mechanickým a tepelným požadavkům. Právě zvýšení teploty přispívá největší měrou k degradaci elektroizolačních materiálů. Vlivem působení nízkých a vysokých teplot při provozu zařízení často dochází ke strukturálním změnám v izolačním materiálu a ke změně jeho mechanických, elektrických i optických vlastností. Tepelné vlastnosti jsou vyjadřovány materiálovými konstantami:

Tepelná kapacita C [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$] vyjadřuje množství přijatého tepla, které je potřeba pro ohřátí daného materiálu o 1 K a je dána vztahem (2.31). Tepelná kapacita je úměrná hmotnosti materiálu, proto můžeme používat *měrnou tepelnou kapacitu* c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Ta určuje, kolik přijatého tepla je potřeba pro ohřátí materiálu o hmotnosti 1 kg o 1 K:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.31)$$

kde Q [J] je teplo, které bylo dodáno materiálu a ΔT je rozdíl teplot mezi počátečním a konečným stavem [K].

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.32)$$

kde m je hmotnost materiálu [kg].

Tepelná vodivost Q [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] udává schopnost daného materiálu vést teplo. Určuje tedy rychlost, jakou se teplo šíří v daném materiálu z teplejší části do části chladnější. Tedy množství tepla Q , které projde za dobu t plochou desky S o tloušťce d , při rozdílu teplot ΔT . Pro porovnávání odlišných materiálů mezi sebou pak používáme měrnou tepelnou vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], která je definována jako množství tepla, které projde za dobu t , materiálem o tvaru krychle s délkou hrany 1 m, v jednom směru mezi dvěma stěnami s teplotním rozdílem 1 K.

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot t \quad (2.33)$$

kde λ je měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], S je plocha [m^2] a d tloušťka [m] desky, t je čas [s] a ΔT je rozdíl teplot [K].

Teplotní součinitel délkové roztažnosti α [K^{-1}] udává změnu jednotky délky daného materiálu při změně teploty materiálu o 1 K.

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (2.34)$$

Teplotní součinitel objemové roztažnosti β [K^{-1}] udává poměrné zvětšení objemu materiálu při změně teploty o 1 K za stálého vnějšího tlaku.

$$\beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (2.35)$$

2.4 Teplota skelného přechodu

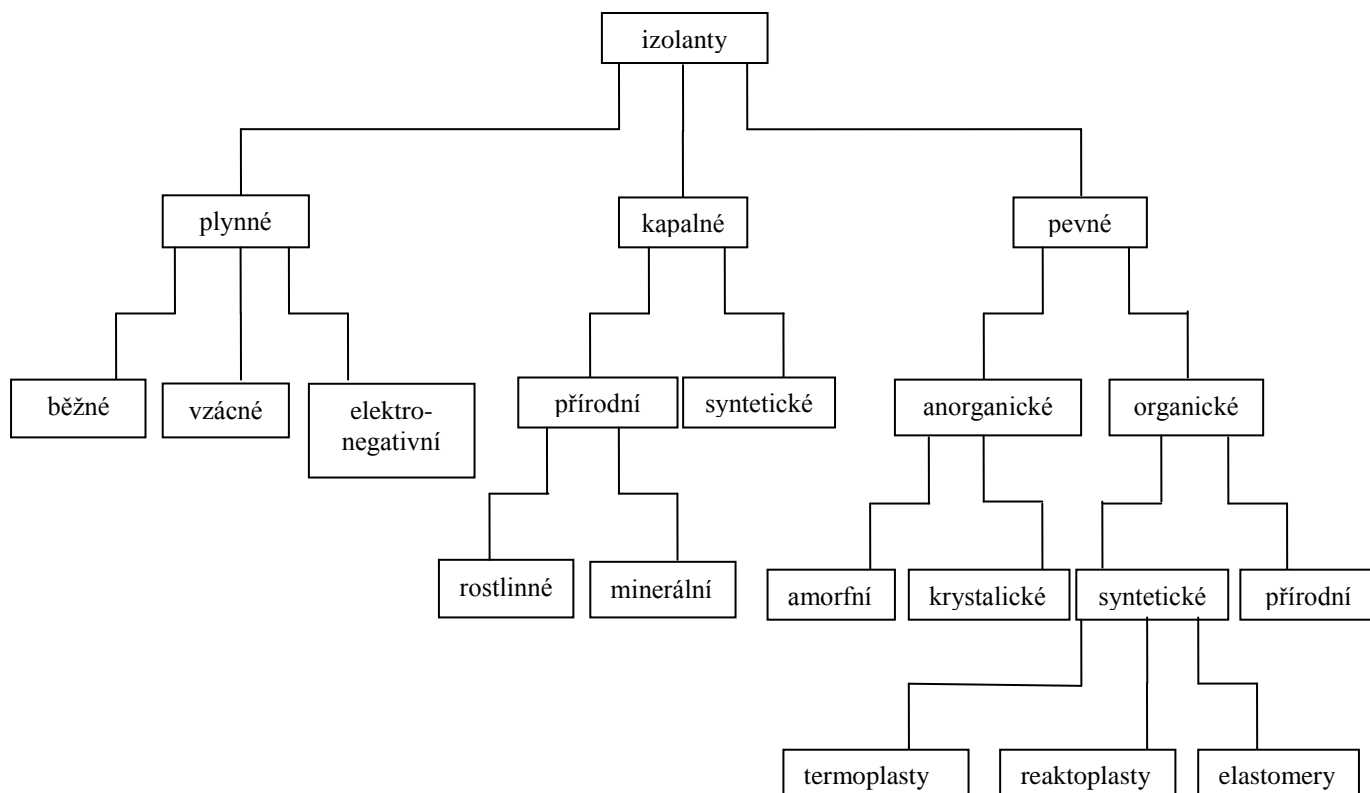
Při teplotní klasifikaci pevných izolačních materiálů je potřeba brát v úvahu oblast teplot, při které je daný materiál schopen konat svou činnost. Rozhodujícím mezníkem v této oblasti teplot je teplota skelného přechodu T_g . Při této teplotě se mění vlastnosti materiálu až o několik řádů. Pro specifické aplikace tedy může být tento parametr rozhodující. U polymerních materiálů dojde při dosažení teploty skelného přechodu ke zvýšení tepelné kapacity, snížení viskozity a k transformaci do krystalické struktury. Elastomery při teplotě T_g vykazují potřebnou pružnost. U reaktoplastů je teplota skelného přechodu používána k určování teploty skladování nevytvrzených nebo částečně vytvrzených materiálů. V tabulce 2.1 je uvedena teplota skelného přechodu a teplota tavení vybraných polymerních materiálů [1,2].

Polymer	Teplota skelného přechodu T_g [$^{\circ}\text{C}$]	Teploty tavení T_m [$^{\circ}\text{C}$]
Polyethylen	-70	135
Polyvinilchlorid	85	190
Epoxidová pryskyřice	50 až 150	-

Tab. 2.1 Teploty skelného přechodu a teploty tavení vybraných polymerů

3 Rozdělení izolantů

Materiály, které je možné použít jako izolační systém v elektrických zařízeních a technice je nepřehledné množství. Základní rozdělení takových materiálů můžeme provést na základě skupenství látek a další pak podle jejich původu. To můžeme vidět na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Rozdělení izolantů

3.1 Plynné izolanty

Plynné izolační materiály mají nejnižší relativní permitivitu ve srovnání s ostatními izolanty. Jejich největší výhodou oproti ostatním skupenstvím je rovnoměrné vyplnění prostoru a možnost použití ve velmi těsných prostorech. Mají velmi dobrou schopnost se regenerovat po přeskočení elektrické energie. Jejich dielektrické ztráty jsou nezávislé na frekvenci a vykazují velmi nízké hodnoty konduktivity.

V běžné praxi je nejčastěji používaným zástupcem plynných izolačních materiálů vzduch. Dále se používají běžné plyny, vzácné plyny a plyny elektronegativní. To jsou takové plyny, které mají vyšší elektrickou pevnost.

Vzduch má za běžných podmínek (teplota 20 °C, tlak 10⁵ Pa) relativní permitivitu rovnou $\epsilon_r = 1,000594$, rezistivitu $\rho = 10^{14}$, ztrátový činitel $\text{tg}\delta = 10^{-6}$ a elektrickou pevnost $E_p = 3,1 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Vzduch se používá jako izolant např. u venkovních vedení, u vzduchových kondenzátorů a u transformátorů. V tabulce 3.1 je uvedeno složení vzduchu.

plyn	Chemická značka	Objemový podíl [%]	Bod varu [°C]
dusík	N ₂	78	-195,8
kyslík	O ₂	21	-183
argon	Ar	0,93	-186
oxid uhličitý	CO ₂	3·10 ⁻²	-78
neon	Ne	1,61·10 ⁻³	-246
helium	He	4,6·10 ⁻⁴	-269
metan	CH ₄	1·10 ⁻⁴	-161,4
vodík	H ₂	1·10 ⁻⁴	-253
krypton	Kr	1,08·10 ⁻⁴	-153
xenon	Xe	8·10 ⁻⁶	-109

Tab. 3.1: Složení vzduchu

Do kategorie běžných plynů, které se používají v elektrotechnice, patří vodík, dusík a oxid uhličitý. Vodík H₂ má 14x nižší hustotu a 7x vyšší měrnou tepelnou vodivost než vzduch. Proto jej v častých případech používáme jako chladící médium velkých točivých strojů nebo v kryogenní technice. V té často uplatňujeme i dusík N₂, který lze také využívat jako chladící izolační látku v suchých výkonových transformátorech nebo jako inertní atmosféru v olejových transformátorech. Oxid uhličitý může najít své uplatnění v izolační technice v podobě dielektrika vysokonapěťových kapacitních normálů.

Z kategorie vzácných plynů se v izolační technice používají plyny helium, neon, argon, krypton a xenon. Tyto plyny patří do skupiny tzv. inertních plynů. To jsou takové plyny, které mají zcela zaplněny valenční orbitály v atomu a tím mají velmi nízkou reaktivitu. Ta ovšem není zcela nulová. Všechny tyto plyny se používají jako náplně výbojek a ve směsi s dusíkem jako plnivo žárovek.

Do poslední skupiny, která je nazývána elektronegativní plyny patří plyny, které obsahují chlor a fluor. Tyto plyny mají sníženou pohyblivost nosičů elektrického náboje, což se projevuje zvýšenou elektrickou pevností. Asi nejpoužívanější elektronegativní plyn v izolační technice je fluorid *sírový* SF₆. Má relativní permitivitu ϵ_r nezávislou na frekvenci a blíží se jedné a teplotní odolnost do 150 °C. Je pětikrát těžší než vzduch a proto je nebezpečné ho používat v uzavřených prostorech nebo výkopech a kabelových šachtách. Používá se v zapouzdřených rozvodnách a transformátorech jako izolační a chladicí médium. Pro jeho schopnost zhaset elektrický oblouk (téměř desetkrát lepší než vzduch) se používá také ve vypínačích velmi vysokého napětí. V okolí elektrického oblouku se rozkládá, zhasíná oblouk a ve zlomku sekundy opět regeneruje. Užití je i v koaxiálních kabelech a podobných aplikacích. V aplikacích plynných izolantů do 220 °C se používají fluorkarbonové (oktafluorpropan C₃F₈) a fluorchlorkarbonové sloučeniny (dichlordifluormetan CCl₂F₂ - freon). Ty můžeme najít například ve vysokonapěťových transformátorech a rentgenových zařízeních [1,3].

3.2 Kapalně izolanty

Kapalně izolanty je možné použít pro své vlastnosti jednak jako izolační materiál, ale také jako chladicí médium vzhledem k dobré tepelné vodivosti a viskozitě. Mají vlastnost dobře vyplňovat složité prostory a odvádět teplo. Mohou být použity také jako impregnace nebo výplně tuhých izolantů, kde následně zlepšují jejich elektrické vlastnosti. Podle původu je dělíme na syntetické kapaliny, minerální oleje a rostlinné oleje.

Rostlinné oleje jsou směsi esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Rostlinné oleje dělíme na vysychavé a nevysychavé. Mezi vysychavé patří lněný a dřevný olej. Dochází u nich k pohlcování kyslíku a tedy k chemické reakci. Oxidaci a zároveň polymeraci. Nevysychavé oleje zastává olej ricinový, který se používá jako impregnace papírových kondenzátorů.

Minerální oleje jsou komplikovanou chemickou směsí uhlovodíků. Získávají se destilováním ropy a její následnou rafinací. Podle obsahu dvou typů uhlovodíků rozeznáváme dva typy minerálních olejů: *Parafinické* (s obsahem lineárních molekul CH₃-CH₂-, -CH₂-, -CH₂-CH₃) a *naftenické*. Nevýhoda minerálních olejů je jejich stárnutí. Působením vnějších vlivů (teplota, záření, pohlcování vody nebo vlhkosti ze vzduchu, působení kyslíku a plynů) dochází ke změnám elektrických vlastností těchto olejů. To můžeme zpomalit přidáním

inhibitorů, které prodlužují životnost minerálních olejů nebo jejich pravidelnou regenerací. Průrazné napětí minerálních olejů dosahuje hodnot $24 \div 28 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, relativní permitivita $\epsilon_r = 2,1 \div 2,4$ a jejich bod vzplanutí je v rozmezí $130 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$. V tabulce 3.2 jsou uvedeny parametry vybraných minerálních olejů.

Olej	T_t [$^\circ\text{C}$]	T_{vz} [$^\circ\text{C}$]	ϵ_r při 20°C	$T_g \delta$ při 20°C	E_p [$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$]
Transformátorový BTA	≤ -45	> 130	$2,1 \div 2,4$	$\leq 0,015$	$9,2 \div 20$
Transformátorový BTS	-40	135	$2,1 \div 2,4$	$0,015$	$9,2 \div 20$
Kabelový vn	≤ -8	> 220	-	-	-
kondenzátorový	≤ -40	> 130	$2,1 \div 2,25$	$< 0,0012$	$> 20,0$

Tab. 3.2: vlastnosti minerálních olejů (T_t – teplota tuhnutí, T_{vz} – teplota vzplanutí)

Syntetické kapaliny byly vyvinuty jako náhrada minerálních olejů. Rozdělují se dle způsobu výroby a složení na polybutyleny, fluorované sloučeniny, organické estery a silikonové kapaliny.

Polybutyleny vznikají polymerací nenasycených uhlovodíků. Jsou to nepolární látky s dobrými elektroizolačními vlastnostmi. Vykazují různou viskozitu a odolnost proti záření. Jsou stabilní i při vysokých teplotách a jsou ekologicky nezávadné.

Fluorované sloučeniny mají ve srovnání s minerálními oleji mnoho předností. Nevýhodou je ale jejich snadné vypařování při zvýšeném bodu tuhnutí za působení vyšších teplot. Jsou to kapalné izolanty velmi stálé s odolností do $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Používají se jako náplň výkonových olejových transformátorů.

Organické estery jsou používány jako kapalné dielektrikum v elektrolytických kondenzátorech. Používají se jako alternativa k polychlordifenylům.

Silikonové kapaliny mají výborné elektroizolační vlastnosti. Jsou ekologicky nezávadné, nehořlavé a jejich vlastnosti jsou teplotně stálé ve vysokém rozmezí teplot.

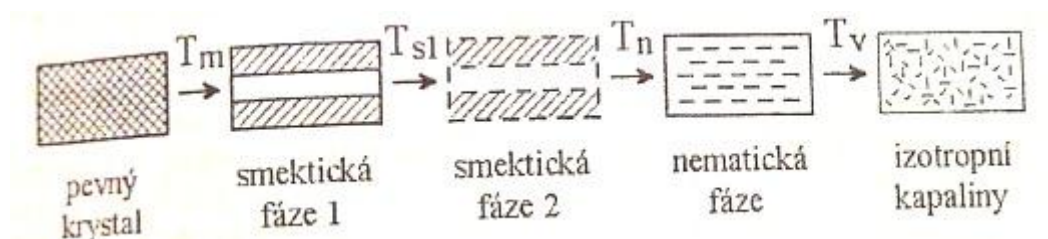
Kapalné krystaly (mezogeny) představují zvláštní skupinu kapalných dielektrických látek někdy nazývaných krystalickými kapalinami. Jsou to organické krystalické látky, které se jako kapaliny vyznačují prostorovým uspořádáním molekul. To je označováno

jako mezifáze nebo parakrystalický stav. Mají vynikající elektroizolační vlastnosti a výrazný dipólový moment. Obecný vzorec krystalických kapalin můžeme zapsat jako:



kde A, B jsou kruhové řetězce jako benzenové jádro, nevinul nebo cyklohexanový kruh, R_1, R_2 jsou akrylové řetězce C_nH_{2n+1} nebo alkoxylové řetězce OC_nH_{2n+1} případně kyanové skupiny CN a X jsou metylenaminové skupiny $(-CH=A-)$ nebo oxykarbonly $(-COO-)$. Vzhledem k velké rozmanitosti složení, kterou můžeme dosáhnout kombinací různých látek lze připravit rozsáhlé množství druhů kapalných krystalů s různými vlastnosti pro jednotlivé aplikace.

Kapalné krystaly jsou charakteristické jednotlivými teplotami přechodů mezi fázemi (obrázek 3.2). Tuhý krystal při teplotě T_m přechází nejprve do smektické fáze, která se v některých případech nemusí vůbec projevit a v některých případech smektických fází může být naopak víc. Dosažení první smektické fáze případně značíme jako teplotu T_{s1} . Po dosažení teploty T_n látka přechází do fáze nematické. Ta už se svou strukturou blíží kapalině. Při tzv. teplotě vyjasnění T_v se z kapalného krystalu stává izotropní materiál. Zajímá nás tedy rozmezí teplot mezi teplotou tání T_m a teplotou vyjasnění T_v , v jejímž rozmezí se nachází mezofáze.

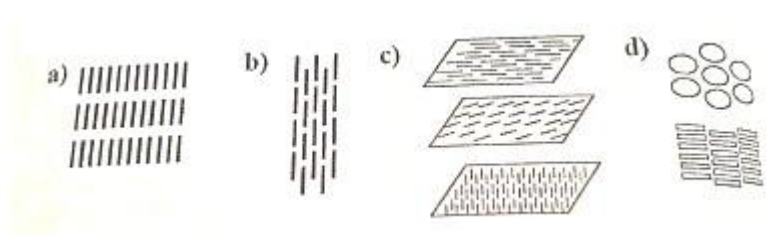


Obr 3.2 Fázové transformace kapalných krystalů, převzato z [3]

Jednotlivé typy mezofází u termotropních kapalných krystalů můžeme vidět znázorněně na obrázku 3.3. Smektická fáze (obr.:3.3a) obsahuje protáhlé a do vrstev uspořádané molekuly. Tečení smektických kapalných krystalů je možné pouze dvourozměrně. Nematická fáze (obr.: 3.3b) má molekuly protáhlé a většinou rovnoběžné. Tečení nematických kapalných krystalů je možné ve všech třech směrech. Cholesterická fáze (obr.:3.3c) se vyznačuje tím, že molekuly nemají žádnou rovinu symetrie. U některých fází může ale dojít k pravidelnému zkroucení struktury kolem osy, která je kolmá na rovinu, ve které se molekuly nacházejí. Stýlická fáze (obr.:3.3d) se vyznačuje pouze jednosměrným tečením. Molekuly mají diskovitý

tvár tvořící sloupce s relativně tuhou vazbou mezi molekulami. Sloupce pak tvoří kubickou nebo hexagonální strukturu a jednotlivé sloupce mají mezi sebou vzájemnou vazbu.

Použití tepelných krystalů v praxi je založeno na poměrně snadném ovlivnění jejich struktury změnou teploty nebo intenzity elektrického pole. Používají se pouze v tenkých vrstvách v řádech 10 μm a jejich uplatnění najdeme v zobrazovacích jednotkách, v defektoskopii izolačních filmů nebo třeba pro mapování elektrických polí.



Obr. 3.3 Tvary termotropních kapalných krystalů, převzato z [3]

3.3 Pevné izolanty anorganické

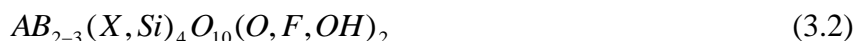
Pevné anorganické izolanty obvykle dělíme do dvou skupin dle jejich struktury. A to na látky bez pravidelného uspořádání v jejich struktuře jako je tomu u amorfních látek (např. sklo) a na látky, které vykazují pravidelnost ve svojí vnitřní struktuře. Takovou skupinu tvoří krystalické a polykrystalické látky (např. azbest, slída, keramika).

Skla jsou nejvýznamnějším zastupitelem amorfních anorganických pevných dielektrik. Z větší části jejich objemu je jejich strukturní uspořádání chaotické. Pouze v případě křemičitých skel tvoří určitou uspořádanost kyslíkokřemičité tetraedry SiO_4 a nebo v případě boritých skel - BO_3 má schopnost vytvářet trojúhelníkovou sklovitou strukturu prvek B_2O_3 . Ionty přídatných látek (Na^+ , K^+ aj.) jsou součástí sklovitých uspořádání a ovlivňují fyzikální (teplota tavení, pevnost, křehkost, barevnost) a elektrické vlastnosti skel. Jsou to látky silně polární s relativní permitivitou pohybující se v rozmezí $\varepsilon = 3,7$ pro čistě křemenné sklo až po $\varepsilon = 16$ a více pro olovnatá skla. Jejich elektrická pevnost se v praxi pohybuje okolo hodnoty $40 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ a maximální hodnota elektrické pevnosti čistých skel může dosáhnout až hodnoty $500 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Skla se používají v široké škále aplikací jako izolační materiál, ale i jako konstrukční izolační prvky. Ve vysokonapěťové technice jde zejména o borosilikátové sklo (Simax) nebo hlinitoborokřemičité sklo (Eutal). Dle použití

můžeme skla dělit na: nízkoztrátová, zátavová, obyčejná alkalická, skleněná vlákna, skleněné pájky.

Azbest je vláknitý silikátový minerál a je odolný vysokým teplotám, oxidaci, korozi, biologické degradaci, kyselinám a zásadám. Je ohebný a nehořlavý, ale při zpracování se mohou uvolňovat vlákna, která jsou karcinogenní a tudíž zdraví škodlivé. Nejčastěji se zpracovává Chryzolit, který je lehce dělitelný na vlákna o průměru 5 mm a délce 2÷100 mm. Z těch se dle jejich délky vyráběli azbestové příze, z kratších vláken se vyráběl azbestový papír tvrzený silikonovou pryskyřicí nebo lepenka a z nejkratších vláken se vyráběly azbestocementové desky. Azbestový lakovaný papír byl používán například jako mezizávitová izolace elektrických točivých strojů. Azbest se nyní používá pouze v aplikacích, kde ho nelze nahradit jinými materiály jako skelná nebo keramická vlákna, kevlar či polypropylen.

Slída je přírodní krystalický minerál s výraznou vrstevnatou strukturou vyskytující se v přírodě v hojném množství. Vykazuje silné kovalentní vazby kyslíku a křemíku ve vrstvách oxidu křemičitého. Slída má výborné elektroizolační vlastnosti, které jsou závislé na směru elektrického namáhání. Buď to ve směru roviny krystalu, nebo ve směru kolmém. Její elektrická pevnost je úměrná obsahu vody ve struktuře a dielektrické ztráty slídy jsou teplotně a frekvenčně závislé. Její vlastnosti jsou stálé a prakticky neměnné až do kalcinační teploty. Při které dojde ke ztrátě vody vázané ve struktuře a to se projeví skokovou změnou vlastností. Nad hranicí kalcinační teploty je proto slída již jako izolační materiál nepoužitelná. Složení slídy udává obecný sumární vzorec 3.2, kde symbol A představuje nejčastěji draslík, případně sodík, bariem, cesium nebo amonný iont. Symbol B zastupuje hliník, lithium, železo, zinek, chrom, vanad, mangan nebo hořčík a symbol X zastupuje nejčastěji hliník, případně berylium, bor nebo železo.



V přírodě se vyskytuje a je známo více než 30 druhů slídových minerálů. Jsou to např.:

- tmavý biotit $K(FeMg)_3AlSi_3O_{10}(F, OH)_2$
- růžový lepidolit $KLi_2Al(AlSi)_3O_{10}(F, OH)_2$
- civaldit $KLiFeAl(AlSi_3)O_{10}(OH, F)_2$

Nejčastěji používané dva druhy slídových materiálů pro elektrotechniku jsou uvedeny v tabulce 3.3.

	muskovit	flogopit
vlastnosti	Draselná slída, kyselý křemičitan hlinitodraselný $\text{KH}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3$	Hořečnatá slída, kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý $\text{KH}(\text{MgF})_3\text{MgAl}(\text{SiO}_4)_3$
barva	Bezbarvý, hnědý, zelený	Jantarový, zlatavý až šedý
hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2,7÷3,2	2,6÷2,8
kalcinační teplota [$^{\circ}\text{C}$]	700÷800	900÷1000
tepelná vodivost Q [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,3÷0,56	0,5÷0,6
relativní permitivita ϵ_r [-]	6÷7	5÷6
ztrátový úhel $\text{tg } \delta$ [-]	$1\div 3\cdot 10^{-4}$	$10\div 50\cdot 10^{-4}$
elektrická pevnost E_p [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]	60	45
vnitřní rezistivita ρ_v [$\Omega\cdot\text{m}$]	$10^{13}\div 10^{14}$	$10^{10}\div 10^{12}$
max. provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	600	900

Tab. 3.3: vlastnosti slídových materiálů: muskovitu a flogopitu

Elektroizolační slídové materiály a slídové izolační systémy dělíme do dvou skupin. Mikanity a materiály z rekonstruované slídy. Tyto materiály se liší tím, že mikanity obsahují slídu v základní formě slídových lístků – krystalů. Oproti tomu remikanity (materiály z rekonstruované slídy) obsahují slídu v rekonstruované podobě. Tyto materiály se většinou používají ve formě tzv. slídového papíru nebo s podkladovým materiálem v podobě skleněných tkanin.

Mikanity se používají např. jako:

komutátorový mikanit. To je materiál ze slídových lístků a šelakového pojiva, který je ve formách slisován do kompaktních desek. Je používán jako mezilamelová izolace komutátorů, které jsou méně namáhány.

Formikanit používaný k výrobě komutátorových manžet. Jedná se o ohebný, lepkavý a tvárný materiál za zvýšené teploty. Vytvrzení je prováděno za teploty 130°C .

Ohebný mikanit je materiál, který je za normální pokojové teploty tvárný a ohebný. Vyrobený je ze slídových lístků nanesených na kalcinovaném slídovém papíru a potažených skleněnou tkaninou. Všechny tyto složky jsou spojeny polyvinylbutyralovou pryskyřicí. Užíván je jako proklad vodičů ve vinutí točivých strojů a na izolaci jejich oblých částí kde je vytvrzován až po kompletní impregnaci vinutí.

Mikafolium je materiál tvořený slídovými lístky spojených speciálním šelakem s celulózovým papírem. Používá se jako izolace vinutí rotorů a statorů elektrických točivých strojů až do provozního napětí 6 kV.

Materiály z rekonstruované slídy tvoří v dnešní době rozsáhlou skupinu materiálů skládajících se z nosného prvku, slídového papíru a pojiva. Vlastnosti těchto slídových izolačních materiálů z rekonstruované slídy určují zejména pojiva. To jsou ve většině případů epoxidové, případně epoxynovolakové pryskyřice. Tyto izolační materiály v praxi používáme jako mezilamelové izolace komutátorů, prokládání vodičů, izolační výstřižky, čela cívek, vyplňování technologických volných prostor nebo izolování drážek.

Keramika je polykrystalický materiál velmi důležitý pro elektrotechnické aplikace v podobě od izolačních hmot až po speciální dielektrika. Výchozí surovina je práškový materiál, který se vytvaruje do požadovaných rozměrů a za teploty nižší než teplota tavení surové keramické hmoty se sline. Složení keramických materiálů je z hlavní části oxid hlinitý Al_2O_3 , oxid křemičitý SiO_2 a voda H_2O . Typické vlastnosti izolačních keramických materiálů jsou odolnost vůči vysokým teplotám a jejich prudkým změnám, odolnost vůči vlhkosti, chemickým vlivům a záření, žáruvzdornost a stabilita fyzikálních a chemických vlastností. Vlastnosti vybraných keramických izolačních materiálů můžeme porovnat v tabulce 3.4. Povrch keramických izolačních materiálů je porézní, proto se musí glazovat. Podle chemického složení a struktury rozdělujeme keramické izolační materiály na:

- silikátové keramiky
- bezsilikátové keramiky
- oxidové keramiky
- bezoxidové keramiky

materiál	hustota	pevnost v ohybu	E_p	ϵ_r	$\text{tg } \delta$	ρ_v při 20 °C
	[kg·m ⁻³]	[MPa]	[kV·mm ⁻¹]	[-]	[-]	[Ω·m]
porcelán	2300÷2500	50	>30	6	0,17÷0,25	10 ⁸ ÷10 ¹⁰
steatit	2600÷2800	120÷140	>20	6	0,02÷0,03	10 ⁹ ÷10 ¹⁰
kordierit	2400÷2600	75	>20	-	-	10 ¹²
ultraporcelán	3300	-	>20	8÷9	0,01	>10 ¹¹
celzián	3200÷3400	80	20	8÷10	0,01	10 ⁹
korund	3700÷3900	220	-	8÷10	0,02	10 ¹⁰ min.
rutilit	4000	-	12	83	0,002÷0,004	10 ¹²
stabilit	4400	-	15	38	0,003÷0,005	10 ¹¹

Tab. 3.4: Vybrané keramické izolační materiály a jejich vlastnosti [3]

Příklady použití některých druhů silikátových keramických izolačních materiálů: Porcelány (izolátory pro aplikace nízkého napětí, vysokého napětí a velmi vysokého napětí) izolátory), kameniny (izolátory a nosiče odporových drátů), steatit (podpěrné izolátory), steatit (vn průchodky a podpěry), ultraporcelán (velmi mechanicky namáhané vř zařazení) a korundové keramiky (vakuová elektronika a vř technika).

3.4 Pevné izolanty organické přírodní

Jsou to přírodní makromolekulární látky živočišného (hedvábí, šelak) a rostlinného (kalafuna, kaučuk, bavlna) původu, případně materiály využívající k výrobě přírodní suroviny (celulóza, papír). Vlastnosti vybraných přírodních pryskyřic nalezneme v tabulce 3.5. Z přírodních pryskyřic rozeznáváme:

Šelak je pryskyřice živočišného původu. Jeho zdrojem jsou výkaly larev živící se šťávou indických gumovníků. Hlavním složením jsou estery mastných kyselin. Při 60 °C se šelak stává ohebným a při dosažení teploty 90 °C taje. Je rozpustný v acetonu a líhu. Používá se jako pojivo pro mikanitu a mikafolia.

Kalafuna je produktem oddestilováním terpentýnu ze smol jehličnatých stromů. Je rozpustná v líhu, benzínu, benzolu, terpentýnu a acetonu. Měkne při teplotě 60 °C. Používá se jako kabelová impregnační hmota a tavidlo při pájení.

Kopál je fosilní nebo také čerstvá pryskyřice, která vzniká výronem z jehličnatých stromů a můžeme jí naléznout v zemi nebo na stromech v podobě smoly. Rozděluje na kopály tvrdé (teplota měknutí T_m až 130 °C) nebo polotvrdé (teplota měknutí od 75 °C). Použití jako přísada olejových laků.

Jantar je pryskyřice fosilního původu s výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Je to nejtvrdší forma pryskyřice a dobývá se spolu s horninou nebo vyplavením na březích Baltského moře. Teplota tání je přibližně 250 °C. Jeho použití je hlavně v oblasti izolací přívodů citlivých měřících přístrojů.

látka	E_p [kV·mm ⁻¹]	ρ_v [Ω ·m]	ϵ_r [-]	tg δ [-]	T_m [°C]
šelak	20 ÷ 30	$10^{13} \div 10^{14}$	3 ÷ 4	0,008 ÷ 0,01	50 ÷ 70
kalafuna	10 ÷ 15	10^{15}	2,7 ÷ 3	0,001 ÷ 0,01	60
kopál	14 ÷ 17	$10^{13} \div 10^{15}$	2,5 ÷ 2,7	0,001 ÷ 0,01	60 ÷ 130
jantar	200	$10^{15} \div 10^{17}$	2,6 ÷ 2,9	0,0005 ÷ 0,0015	175 ÷ 200

Tab. 3.5: Vlastnosti vybraných přírodních pryskyřic

3.5 Syntetické makromolekulární látky

Syntetické makromolekulární látky jsou v elektrotechnice velmi používanými materiály pro jejich rozsáhlé kladné vlastnosti. Jsou vyhovujícím materiálem, na který je pohlíženo jako na dielektrikum, konstrukční materiál, ochranný nebo pouzdřicí materiál a za určitých podmínek i jako materiál elektricky vodivý. Makromolekula vzniká z chemického hlediska spojením většího počtu molekul základních látek, ty nazýváme monomery. Monomery přecházejí v makromolekuly při chemických reakcích, jako jsou polymerace, polykondenzace, polyadice a dalších polyreakce. Vzniklé látky obecně nazýváme polymer. Makromolekuly, které jsou tvořeny pouze jedním typem monomeru, označujeme jako kopolymery. Ty, které obsahují více typů, nazýváme kopolymery. Stupeň polymerace P_M vyjadřuje počet opakujících se monomerů v makromolekule a je dán vztahem 3.3, kde m_{PM} je hmotnost polymeru a m_{MM} hmotnost monomeru. Za makromolekuly považujeme molekuly obsahující více než tisíc atomů. V takovém počtu již makromolekula vykazuje odlišné vlastnosti než monomer.

$$P_M = \frac{m_{PM}}{m_{MM}} \quad (3.3)$$

Polymerace je chemická reakce, při níž se sdružují molekuly uvolněné z dvojných vazeb monomerů. Vzniklá makromolekulární látka má stejné chemické složení jako látka počáteční a mohou v ní přecházet (polymerovat) pouze organické sloučeniny s dvojnou vazbou C=C, C=N, C=O. Polymerace má tři fáze. V první fázi – iniciaci - je aktivací dvojně vazby monomeru dodáním vnější energie vytvořen zárodek makromolekuly. V druhé fázi – propagaci - makromolekula roste a ve třetí fázi – terminaci - je její růst ukončen.

Polykondenzace je pomalá, stupňovitá chemická reakce, při níž se sdružují různé druhy monomerů, přičemž výsledná makromolekulární látka se svým chemickým složením liší od výchozích látek. Obsahuje-li výchozí látka dvě funkční skupiny (dvě reakční místa), je výsledný produkt lineární. Při třech funkčních skupinách se již vytváří prostorové makromolekuly.

Polyadice je určitým typem polykondenzace, kdy dochází k vnitřní molekulární přeměně. Makromolekulární látky vznikají postupnou adicí monomeru na charakteristickou funkční skupinu. Charakteristickým příkladem polyadice je vytvrzování polyuretanové a epoxidové pryskyřice.

Makromolekulární izolační materiály rozdělujeme dle stěžejních vlastností a jejich chování. Nejdůležitější faktory posuzování jsou následující:

a) působení teploty při zpracování

- * termoplasty – při zvyšování teploty makromolekulární látky měknou a stává se z nich tavenina. Po vychladnutí opět ztuhnou a tento proces je opakovatelný.
- * reaktoplasty – při navyšování teploty reaktoplasty nejdříve měknou a následně dochází k vytvrzování a materiál se stává netavitelný.

b) suroviny, ze kterých je makromolekulární látka vyrobena a jejich původ

- * přírodní látky
- * modifikované přírodní látky
- * zcela syntetické látky

c) chemické složení hlavního řetězce

- * uhlíkaté
- * křemíkové

d) druh polyreakcí

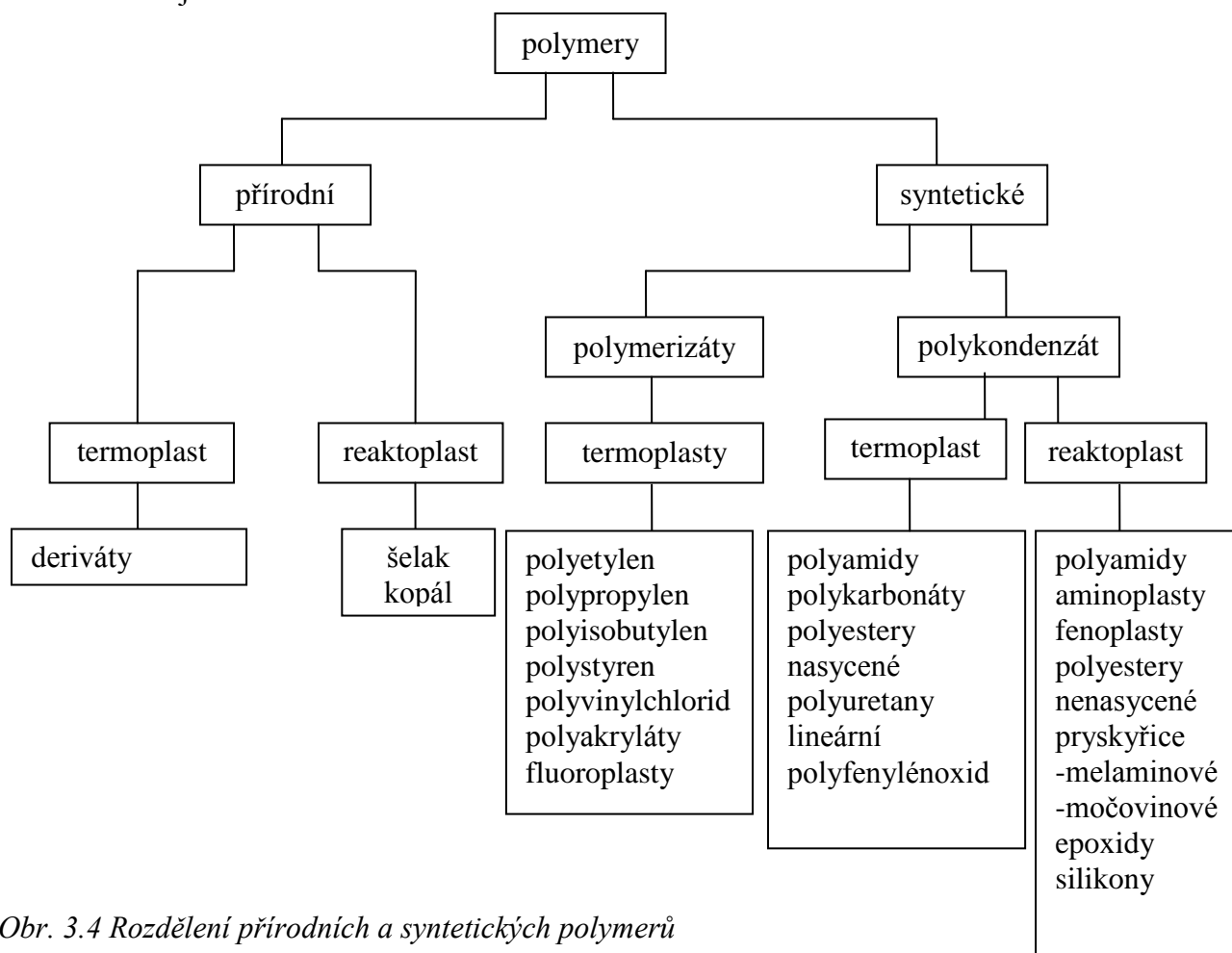
- * polymerizáty
- * polykondenzáty
- * polyadukty
- * modifikované plasty

e) fyzikálně mechanické vlastnosti

- * plastomery
- * elastomery

f) chemická odlišnost hlavních skupin

- * přírodní pryskyřice
- * přírodní kaučuk a jeho deriváty
- * polyestery
- * polykarbonáty
- * aminoplasty
- * a jiné



Obr. 3.4 Rozdělení přírodních a syntetických polymerů

Na obrázku 3.4 můžeme vidět názorné rozdělení nejdůležitějších přírodních a syntetických polymerů. V praxi je ale příhodné označování plastů a kopolymerů dle mezinárodně uznávaných zkratk. Tyto zkratky respektují i obsah změkčovadel v jednotlivých látkách a charakteristické vlastnosti. Seznam nejdůležitějších plastů a homopolymerů používaných v elektrotechnice najdeme v tabulce 3.6.

CF	kresolformaldehydová pryskyřice	MF	melminformaldehydová pryskyřice
EP	epoxydy	PS	polystyren
PMMA	polymethylmetakrylát	PTFE	polytetrafluoretylen
PA	polyamid	PUR	polyuretan
PC	polykarbonát	PVC	polvinylchlorid
PE	polyetylen	SI	silikony
PET	polyetylentereftalát, polyetylnglykoltereftalát	UF	močovinoformaldehydová pryskyřice
PF	fenolformaldehydová pryskyřice	UP	nenasycené polyestery
PI	polyamid	PP	polypropylen
PE-LLD	lineární nízkohustotní polyetylen	PVC-P	měkčený polyvinylchlorid
PE-HD	vysokohustotní polyetylen	PVC-U	neměkčený polyvinylchlorid
PE-C	chlorovaný polyetylen	PS-E	lehčený polystyren
PE-V	síťovaný polyetylen	PS-HI	vysokohouževnatý polystyren
PVC-C	chlorovaný polyvinylchlorid	PS-I	houževnatý polystyren

Tab. 3.6: Zkratky homopolymerů a plastů

Oproti polymeru, který je chemickou látkou, je plast technický materiál. Plast tedy musí mít určité vlastnosti, které jsou požadovány a při vytváření plastů je třeba přidávat různá aditiva (stabilizátory, maziva, modifikátory, změkčovadla, plniva, pigmenty atd.) která vylepšují mechanicko – fyzikální vlastnosti plastů. Výsledné vlastnosti jsou také ovlivněny druhem a množstvím přísad a cizích látek a nečistot. Elektroizolační vlastnosti vybraných plastů nalezneme v tabulce 3.7.

Polymer	ϵ_r [-]	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$ [-]	ρ_v [$\Omega \cdot \text{m}$]	ρ_s [Ω]	E_p [$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$]
PP	2,27	4	$>10^{15}$	10^{13}	40÷60
PS standardní	2,5	1÷4	$>10^{14}$	$>10^{13}$	70
PS houževnatý	2,5÷4,7	4÷20	$>10^{14}$	$>10^{13}$	60
PVC	3,5	150÷170	10^{13}	10^{13}	35÷50
PTFE	$<2,1$	<2	$>10^{16}$	10^{17}	48
PMMA	3,6	600	$>10^{13}$	10^{15}	30÷50
PC	3	7	$>10^{15}$	$>10^{15}$	35÷38
PA 6	3,8	290÷400	10^{10}	10^{10}	40
EP vytvrzený ftalanhydridem	3,55	10	$>10^{12}$	$>10^{12}$	30÷40
PI	3,5	20	$>10^{14}$	$>10^{15}$	56
PE lineární	2,35	2,4	$>10^{15}$	10^{14}	42
PE rozvětvený	2,29	1,5	$>10^{15}$	10^{14}	380

Tab. 3.7: Elektrické vlastnosti vybraných plastů

Přehled nepoužívanějších makromolekulárních izolačních látek

Polyetylen (PE) je téměř nepolární a nejjednodušší termoplast, který je vyráběn polymerací a v současnosti nepoužívanější polymer. Má vynikající elektroizolační vlastnosti, které jsou málo závislé na teplotě ($-80 \div 100$ °C) a frekvenci. Je chemicky odolný, hořlavý, na vzduchu se projevuje stárnutí. Používá se v kabelové technice, jako izolace elektronických přístrojů a ve vf technice a v aplikacích do 80 °C.

Polypropylen (PP) je téměř nepolární termoplastický polymer, který patří mezi nejběžnější plasty. Je to houževnatý, pružný a tvrdý materiál. Má vynikající elektroizolační vlastnosti a dobrou chemickou odolnost. Používá se jako náhrada za polyvinylchlorid (PVC) pro izolace elektrických kabelů a jako izolace ve speciálních aplikacích, kde není možné dobré větrání (tunely). Polypropylen při hoření produkuje pouze omezené množství kouře a toxických halogenuhlovodíků.

Polystyren (PS) je jedním z nejrozšířenějších tepelně zpracovatelných plastů – termoplastů. Vlastnosti polystyrenu jsou závislé na molekulové hmotnosti. Je to materiál s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi, také je poměrně tvrdý a zároveň křehký. Při stárnutí křehne a vytvářejí se v jeho struktuře trhliny. Polystyren je citlivý na UV záření a špatně odolává zvýšeným teplotám. Používá se např. ve vf technice.

Polvinylchlorid (PVC) je dipólová látka s vlastnostmi závislými na molekulové hmotnosti. V současné době je druhým nepoužívanějším polymerem vůbec. Je to látka

značně chemicky a tepelně odolná, nerozpustná ve vodě a v řadě organických rozpouštědel. Používá se jako elektroizolační materiál a v měkčené podobě pro pláště kabelů.

Polytetrafluoretylen (PTFE) je nepolární, nepřilnavý a chemicky nejodolnější plast. Vykazuje výborné elektroizolační vlastnosti a je nehořlavý. Má velikou tepelnou odolnost ($-260 \div 260$ °C). Vyrábí se pod názvem Teflon a používá se ve vf technice, jako elektroizolační fólie.

Polyamidy (PA) jsou látky polární, které mají své fyzikálně-chemické vlastnosti dány svojí molekulovou hmotností a chemickým složením. Za sucha vykazují velmi dobré elektroizolační a mechanické vlastnosti. Jsou to látky značně navlhavé a hořlavé. Vyrábějí se také speciální polyamidy pod názvy Nylon, Ultramid A, Maranyl nebo Spolamid. Používají se jako sekundární izolace.

Polykarbonáty (PC) jsou slabě dipólové a částečně krystalické látky. V rozmezí teplot $-100 \div 140$ °C mají dobré elektroizolační a mechanické vlastnosti a jsou odolné vůči UV záření. Používají se jako izolace vodičů, drážkové izolace, jako dielektrika kondenzátorů a součásti stykačů a vypínačů.

Polyamidy (PI) patří mezi nejhouževnatější plasty, které jsou slabě dipólové. Vykazují mimořádnou odolnost proti zvýšené teplotě (krátkodobě až 500°C, trvale 200°C), odolné vůči nízké teplotě (až -190°C) a jsou nehořlavé, odolné proti povětrnostním vlivům a organickým rozpouštědlům, odolávají účinkům záření β a γ . Jedním z důležitých polyamidů je materiál zvaný Kapton. Používá se pro opláštění kabelů, drážkové izolace, ohebné plošné spoje, lakování drátů a impregnační laky.

Polyestery jsou početnou skupinou makromolekulárních látek. Nejvýznamnějším zástupcem je polyetylentereftalát (PET), který má slabý dipól a výborné elektroizolační vlastnosti. Je teplotně stálý ($-60 \div 150$ °C) a má vynikající fyzikální a chemické vlastnosti. Používá se pro elektroizolační fólie, drážkové izolace, dielektrikum v kondenzátorech, izolační díly a izolace vodičů a kabelů.

Polyuretany (PUR) jsou látky, které mají všechny vlastnosti závislé na tepelné odolnosti ($-80 \div 130$ °C). V elektrotechnice se používají např. jako zalévací pryskyřice pro kabelové spojky.

Epoxidy (EP) jsou reaktoplasty připravované polyadící. V elektrotechnice se používají jako lící a odlévací pryskyřice, lepidla, pojiva, tmelící a nátěrové hmoty.

Silikonové oleje a tmely jsou čiré, bezbarvé a neutrální látky. Mají velmi nízkou viskozitu s teplotní odolností na vzduch 150÷180 °C. Používají se jako speciální kapalná dielektrika.

Silikonové pryskyřice se po vytvrzení vyznačují značnou tepelnou odolností (trvale až 200 °C, krátkodobě 300 °C) a elektroizolační schopností. Vykazují velmi malou změnu elektrických parametrů při změně teploty. Jsou odolné vůči povětrnostním vlivům a používají se jako impregnační laky nebo jako pojivo ve skelných laminátech v konstrukci motorů pracujících ve vysokých teplotách.

Etylen-propylenové elastomery (EPM) mají velmi dobrou odolnost proti polárním činidlům, jsou odolné kyselinám, alkoholům a alkáliím. Používají se na izolaci kabelů v elektrotechnice, kde je potřeba odolnost proti povětrnostním vlivům.

Chlorsulfonovaný polyetylen (CSM) má vedle dobré chemické a tepelné odolnosti výborné i mechanické vlastnosti. Je nehořlavý a odolný proti olejům, ozónu, kyselinám, oxidačním činidlům. Používá se na pláště kabelů.[1,3]

3.6 Teplotní klasifikace elektroizolačních materiálů

Pro elektrotechnické zařízení je důležitým faktorem prostředí, ve kterém zařízení vykonává svou funkci. Významným činitelem je vliv teploty na izolační systém zařízení. Proto se izolanty rozděluje do teplotních tříd pro snadné určení a přiřazení příslušného rozsahu maximálních pracovních teplot. Teplotní třída izolačního systému je průměrem teplotních tříd jednotlivých izolačních materiálů. Klasifikace do jednotlivých tříd je prováděna dle normy ČSN EN 60085 „Elektrická izolace – Teplotní klasifikace“ a dle tabulky 3.8.

Relativní index teplotní odolnosti RTE	Teplotní třída	Písmenné označení
<90	70	-
>90÷105	90	Y
>105÷120	105	A
>120÷130	120	E
>130÷155	130	B
>155÷180	155	F
>180÷200	180	H
>200÷220	200	N
>220÷250	220	R
>250	250	-

Tab. 3.8: Teplotní klasifikace izolačních materiálů

Charakteristické materiály pro jednotlivé teplotní třídy

Materiály teplotní třídy 70 – Do této skupiny řadíme organické materiály, jako je papír, dřevo, bavlna bez dalších chemických úprav a impregnací. V elektrotechnice používané jen výjimečně.

Materiály teplotní třídy 90 (Y) – Tuto teplotní třídu zastupují organické materiály z teplotní třídy 70, ale společně s běžnými impregnanty jako jsou šelak, asfalty, bitumeny a oleje. Do této skupiny patří i vrstvené bukové dřevo a polvinylchlorid jako izolace vodičů.

Materiály teplotní třídy 105 (A) – Zastupují je organické materiály, jako jsou bavlna, dřevo, papír a přírodní i syntetické tkaniny. Jsou již ale opatřeny odpovídající impregnací nebo lakem.

Materiály teplotní třídy 120 (E) – V této skupině se používají organické materiály (papír, tvrzený papír, buničina) opatřené fenolformaldehydovou nebo fenolickou pryskyřicí. Používají se jako oddělovací desky, izolace a podložky.

Materiály teplotní třídy 130 (B) – Mezi tuto skupinu materiálů většinou patří anorganické materiály, jako jsou skleněná vlákna nebo azbest v kombinaci s vhodnými epoxidy či fonetickými pryskyřicemi. Jsou běžně používány k izolačním a konstrukčním účelům a na ovíjení mechanicky namáhaných izolací.

Materiály teplotní třídy 155 (F) – V této skupině se nacházejí skleněná vlákna, slídový papír, PET, PEN fólie, epoxidové a novolakové fólie. Kompozitní materiály na bázi skleněných vláken a epoxidové pryskyřice jsou užívány na konstrukční prvky mechanicky a elektricky namáhané jako jsou stroje vn a vysokonapěťové izolační systémy. Patří sem aramidový papír (Nomex) a epoxidová pryskyřice na bázi bifenyly, která se používá k impregnaci točivých strojů technologií VPI.

Materiály teplotní třídy 180 (H) – V této teplotní třídě se u izolačních materiálů používají pojiva na bázi silikonové a modifikované epoxidové pryskyřice. Používají se polyamidy, polyestery, slída a slídový papír, který má obchodní názvy (Remika, Samica, Calmica, atd.). Pro izolaci vodičů, mezizávitovou izolaci a izolaci konců vinutí cívek pro vysokonapěťové točící stroje se v této teplotní třídě užívá kompozitní materiál – slídový papír, skleněná tkanina, pružný silikonový elastomer. Pro drážkovou izolaci malých a středních motorů je využíván Nomex a polyesterové fólie. Systém skládající se z kalcinovaného slídového papíru, epoxidové pryskyřice a polyamidové fólie se užívá pro izolace vysoce teplotně namáhaných vinutí motorů.

Materiály teplotní třídy 200 – Tuto teplotní třídu zastupují materiály, jako jsou sklo, azbest, aramidové papíry se silikonovými pojivy a impregnační polyesteralkydové laky.

Materiály teplotní třídy 220 – Tuto teplotní třídu izolačních materiálů zastupuje sklo ve formě vláken, azbest, aramidové papíry a silikonová pojiva. Aromatické polyamidy pro izolace závitů cívek, přepážky transformátorů, izolace vodičů, cívek a motorové vývody. Aramidový papír se silikonovou pryskyřicí pro drážkovou izolaci, izolaci přívodů a spoju vinutí a dodatečnou ochranu kabelů.

Materiály teplotní třídy 250 – V této třídě se užívají materiály třídy 220 s modifikovanými pojivy. Například slída se silikonovým pojivem, které při provozu může záměrně shořet a zůstane tak pouze slída v požadovaném tvaru. Tuto kombinaci izolačního materiálu používáme při vysokých teplotách a radiaci. Patří sem ale také polyamidy (Kapton), aramidy (Nomex) nebo polymer PTFE.

Materiály mimo teplotní třídy – V této třídě se vyskytují materiály pro speciální aplikace přesahující standardní teplotní třídy. Jsou to zejména keramické izolanty (silikátové a bezsilikátové keramiky, oxidové a bezoxidové keramiky). Patří sem také materiál Kapton, který má krátkodobou teplotní odolnost až 450 °C a nebo sklo-hliníková fólie užívaná pro aplikace až do 500°C [1,3].

4 Degradace elektroizolačních materiálů

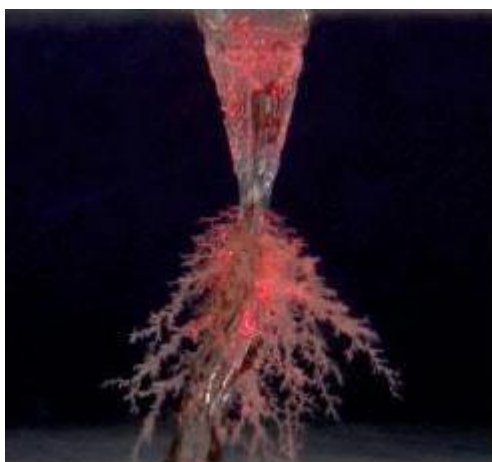
Veškeré elektroizolační materiály jsou nedílnou součástí elektrických zařízení a jako jejich nejdůležitější součást z hlediska funkce a bezpečnosti jsou podrobně zkoumány. Studují se zejména degradační procesy elektroizolačních materiálů. Degradace elektroizolačního materiálu, neboli stárnutí, je definováno jako postupné nevratné změny vlastností elektroizolačního systému důsledkem působení jednoho nebo více ovlivňujících faktorů [8].

4.1 Elektrické stárnutí

Elektrické stromečky

V elektroizolačním materiálu může vlivem působení elektrického pole o dostatečné intenzitě dojít ke vzniku vodivých cest. Jedná se o vodivé kanálky šířící se k místu s rozdílným elektrickým potenciálem. Dostatečná intenzita elektrického pole postačující k vytvoření elektrického stromečku může vzniknout již za jmenovitého napětí na místě ostrého rozmezí materiálů. Tím může být například obsažená nečistota v materiálu, proniklý ostrý předmět nebo elektroda. Růstem elektrického stromečku vlivem působení částečných výbojů v izolačním materiálu může dojít až k průrazu materiálu. Kanálky elektrických stromečků mohou být vyplněny plynem nebo degradačními zplodinami, které jsou často elektricky vodivé. V některých případech mohou kanálky obsahovat kapaliny, které mohou do izolačního materiálu proniknout z okolí, nebo mohou být produktem chemických reakcí uvnitř materiálu.

Průběh vzniku elektrického stromečku uvnitř izolačního materiálu je nejčastěji simulován a zkoumán pomocí hrotu jehly a uzemňovací elektrody vložené do krychličky materiálu z epoxidové pryskyřice a svým tvarem může připomínat strom nebo keř, viz. obrázek 4.1.



Obr. 4.1 obrázek elektrického stromečku, převzato z [11]

Růst elektrického stromečku je rozdělen do tří fází:

Fáze první je detekovatelná jen za pomoci speciálních, velmi citlivých přístrojů a jedná se o začátek růstu stromečku.

Fáze druhá je považována od okamžiku, kdy je vytvořena první větev stromečku. Z té se následně začnou rozvětňovat další, které směřují a postupují k uzemňovací elektrodě. Druhá fáze končí okamžikem, kdy se vodivý kanálek dotkne uzemňovací elektrody. V této fázi nedochází k elektrickému průrazu, jelikož elektrická vodivost kanálku (malé větve elektrického stromečku) je nedostačující pro průrazný proud. Průměr těchto malých větví (kanálků) je menší než 10 μm .

Fáze třetí je intervalem prvního spojení elektrod a průrazem dielektrického materiálu. V této části se vodivé kanálky rozvětňují a rozšiřují na průměr větší než 10 μm . Tyto kanálky jsou již duté, a jakmile jeden celý dutý kanálek propojí obě elektrody, dojde k průrazu dielektrika [11].

Pulzní namáhání

V současné době, kdy pro řízení asynchronních motorů používáme frekvenční měniče, vyvstává problém v podobě negativních účinků pulzního napětí na izolační systém točivého stroje. Požadavky na přesné řízení motorů jsou vysoké a používá se proto pulzně šířková modulace pro řízení napětí na svorkách motoru. Strmost nárůstu napětí pulzu může dosahovat až desítky $\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ opakovací frekvencí v řádech jednotek kHz a díky tomu je dosahováno nižších spínacích ztrát a stabilnější moment. Bylo však zjištěno výrazné snížení životnosti a spolehlivosti izolačního systému asynchronního motoru při napájení frekvenčním

měníčem. Byla pozorována hranice strmosti nárůstu napět'ového pulzu $500 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, při jejíž překročení se již působení pulzního namáhání začíná silně projevovat.

Pulzním napětím dochází v izolačním systému motoru ke vzniku ztrát a tím k přehřívání namáhaných oblastí, k přepět'ovým jevům na přívodních kabelech, ke zvýšení výskytu částečných výbojů a ke zrychlení procesu stárnutí izolačního materiálu (mezizávitová a statorová izolace) vlivem pulzního napětí [9,10].

Částečné výboje

Jedním z elektrických výbojů, vyskytujících se při provozování elektrických systémů jsou částečné výboje. To jsou takové elektrické výboje, které zčásti propojují dvě místa s rozdílným elektrickým potenciálem. Taková místa mohou být dva vodiče nebo elektrody oddělené izolačním materiálem. Částečné výboje jsou ve většině případů důsledkem místního elektrického namáhání v izolaci, na povrchu izolace v okolí vodičů, případně na povrchu izolace v okolí elektrod. Částečné výboje se obecně vyskytují jako impulzy trvající $<1\mu\text{s}$ a svým výskytem významně ovlivňují vlastnosti izolačních materiálů a jejich životnost a spolehlivost. Na elektroizolační materiál mají svojí přítomností účinky chemické (chemické procesy vedou ke zvyšování vodivosti materiálu), elektrické (vznik vodivých drah), erozivní a tepelné (dochází k tepelnému průrazu). Mohou také produkovat v místě výskytu plynné, kapalně a pevné produkty. Obecně částečné výboje rozdělujeme podle místa jejich výskytu:

Vnější částečné výboje - To jsou částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení jako např. doutnavé a korónové výboje.

Vnitřní částečné výboje - Jsou částečné výboje v plynech, obklopené pevným nebo kapalným dielektrickým materiálem. Jsou to např. částečné výboje v plynných dutinkách pevných dielektrických materiálů.

Povrchové částečné výboje - To jsou výboje nacházející se v okolí elektrod na hranici mezi pevným a plynným dielektrickým materiálem. Jsou to např. klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky v elektrických točivých strojích, průchodkách atd. [2].

Výskyt částečných výbojů v izolačních materiálech způsobuje svojí přítomností selhávání dlouhodobě namáhaných izolací. To je zapříčiněno výskytem částečných výbojů v nehomogenitách dielektrika (např. bublinkách vzniklých při výrobě pevného dielektrického materiálu), kde způsobují fyzikální a chemické změny materiálu v bezprostřední blízkosti

jejich výskytu. Přítomnost částečných výbojů vede k nevratným změnám ve struktuře materiálu a ke zhoršení zejména elektrických vlastností dielektrik.

K přeskokům částečných výbojů v dutinách dielektrického materiálu nedochází dle Paschenova zákona současně při stejném napětí, ale postupně podle velikosti dutiny a podle velikosti přiloženého elektrického napětí. Neutrální částice plynu v dutině se při výboji rozkládají na kladné a záporné ionty, které mají opačný smysl pohybu vůči elektrickému poli a vytvoří tak postupně na stěnách dutiny nehomogenity. Elektrické náboje hromadící se na stěnách vytváří vnitřní elektrické pole s opačnou polaritou, což částečně kompenzuje elektrické pole vnější. Výboj v dutince trvá do doby, než hromadící se náboje na stěnách potlačí napětí na dutince pod hodnotu zhasacího napětí U_e . V tomto okamžiku výboj zhasíná. Pokud je střídavé napětí přiložené na izolační materiál opět zvyšováno, dojde ve vnitřní struktuře materiálu k nárůstu napětí v dutinkách na mez zápalného napětí a celý děj se opakuje. V případě, že se napětí na izolantu dále nezvyšuje, dochází k postupnému odcházení nahromaděných nábojů a napětí na dutinkách se opět zvyšuje, než dojde opět k výboji. Rychlost odtékání nábojů ze stěn dutinky závisí na jejím povrchovém odporu a vnitřním odporu izolačního materiálu a je ovlivněna kvalitou izolačního materiálu. U nekvalitních materiálů k opakovanému výboji může docházet v intervalech menších než 1 s. U kvalitních materiálů naopak v intervalech v řádech hodin.

Degradační účinky částečných výbojů působí na různé izolační materiály jinou intenzitou. Anorganické izolační materiály, jako je například slída nebo porcelán, jsou vůči účinkům částečných výbojů poměrně odolné. Na druhou stranu organické materiály, jako jsou například PET, PEN, PE, PTFE a kompozity obsahující epoxidové pryskyřice, jsou na projevy degradace částečnými výboji velmi citlivé [2,10].

4.2 Tepelné stárnutí

Vliv teploty na stav elektroizolačních materiálů je značný a projevuje se po celou dobu jejich provozu. Vlivem teplotního namáhání dielektrických materiálů dochází k chemickým a fyzikálním změnám, které mají za následek zhoršení elektrických a mechanických vlastností a snížení životnosti a spolehlivosti izolačního systému. Tyto změny jsou většinou zvýšenou teplotou urychleny nebo spuštny. Teplotní namáhání izolačních systémů může být krátkodobého nebo dlouhodobého charakteru, přičemž dlouhodobé tepelné účinky většinou

vedou k nevratnému poškození izolantů. Teplotní namáhání nemusí být vyvoláno pouze vysokými, případně nízkými teplotami nebo jejich střídáním, ale může být zapříčiněno jevy elektrického charakteru (to mohou být například částečné výboje), zhoršeného odvodu tepla a podobně.

Například u transformátorových olejů může vlivem působení teplotního namáhání docházet k termooxidaci, polymeraci nebo polykondenzaci. Vlivem těchto reakcí dochází ke vzniku organických látek a látek rozpustných v oleji. Tím se může snižovat elektrická pevnost, jelikož tyto látky mohou být polárního charakteru [2,12].

4.3 Stárnutí na základě působení okolního prostředí

Proces stárnutí elektroizolačních systémů je ovlivněn přítomností dalších působících faktorů, jako jsou např. chemické zplodiny, vlhkost, záření apod.

Vlhkost může být vstřebávána z okolního prostředí v různém množství u různých typů dielektrických materiálů. Nejčastěji se vlhkost do elektroizolačního systému dostane ze vzdušné vlhkosti a ovlivňuje pak např. mechanické vlastnosti, permitivitu, rezistivitu nebo elektrickou pevnost izolace. Povrchová vlhkost společně s námrazou může vlivem střídání teplot způsobovat erozi povrchu materiálu a přeskoky. U polymerů může docházet vlivem vlhkosti a působícího elektrického pole k vodním útvarům zvané vodní stromečky, které ovlivňují elektrickou pevnost.

Kyslík má svými oxidačními účinky na materiál vliv v podobě nevratných změn vlastností elektroizolačních materiálů. Nejcitlivější z nich jsou polymery. Míra působení kyslíku na izolační materiál je dána přítomností dalších faktorů včetně chemického složení, přítomnosti antioxidantů, teploty a vlhkosti.

Chemikálie mohou způsobovat různá poškození a je jim potřeba věnovat patřičnou pozornost. V laboratorních testech zjištěné odolnosti dielektrických látek proti chemickým látkám se mohou v praxi poněkud lišit. Většinou se můžeme setkat s interakcí různých chemických vlivů a různých okolních podmínek. Elektroizolační systém je složitý celek základních materiálů a příměsí, přičemž celková odolnost takového systému může být odlišná od odolnosti jednotlivých dielektrických materiálů.

Mikroorganizmy jsou dalším degradačním faktorem elektroizolačních materiálů. Jedná se zejména o mikroorganizmy na organické bázi, které mohou využívat elektroizolační

system jako zdroj energie. To má za následek chemické, mechanické a elektrické narušení izolace. Nejdůležitější mikroorganismy z hlediska degradace materiálu jsou plísně a bakterie, které navíc s rostoucí vlhkostí mohou získávat na agresivitě.

Povětrnostní vlivy ovlivňují změny teploty, vlhkosti, proudění vzduchu, srážky, znečišťující látky, záření apod. Mechanické částice unášené prouděním vzduchu mohou narušovat povrch elektroizolačních materiálů a tím zrychlit proces stárnutí materiálu nebo pronikání vlhkosti a jiných agresivních látek do struktury materiálu. Měkčené materiály zpravidla působením povětrnostních vlivů díky zesíťování řetězců ve struktuře materiálu tvrdnou a jiné látky mohou naopak měknout. Při výrazných změnách povrchové vrstvy může docházet k vnitřnímu prnutí a vzniku mikrotrhlin v dielektrickém materiálu.

Znečišťující látky a prach pocházejí z přírodních i umělých zdrojů. Tyto částice spolu s vlhkostí způsobují na povrchu materiálu povrchovou elektrickou vodivostí, vznik kyselých či zásaditých roztoků a chemickou a elektrolytickou degradaci elektroizolačního systému.

Dalším významným degradačním činitelem může být radiace, která způsobuje degradaci materiálu vlivem vysokoenergetických částic, nebo například UV záření [2].

4.4 Modely stárnutí při působení jednoho faktoru

Mezi tyto modely patří takové modely, které jsou založené na předpokladu stárnutí izolačního materiálu při působení pouze jednoho hlavního faktoru. Patří mezi ně modely tepelného, mechanického a elektrického stárnutí.

4.4.1 Modely mechanického stárnutí

Modely mechanického stárnutí jsou závislé na různých vlastnostech materiálů a na různých druzích mechanického namáhání elektroizolačních materiálů.

Odingův model je exponenciální model, který je založen na principu růstu trhlin při tahovém namáhání. Vakanice se v materiálu budou přemísťovat z míst podléhajících většímu roztažení do míst v materiálu, které nejsou tolik namáhány tahovým napětím. Doba života elektroizolačního materiálu, na který působí mechanické stárnutí, odpovídá exponenciálnímu vztahu mezi mechanickým zatížením a dobou do lomu materiálu. Toto je popsáno v rovnici 4.1.

$$\tau = \left(\frac{C}{A} \right)^{\frac{1}{m}} e^{-\left(\frac{\alpha+\beta}{m} \right) \sigma} \quad (4.1)$$

kde τ [h] je doba do lomu, σ [Pa] je mechanické napětí, m je ukazatel schopnosti hromadit vakance, α je parametr při odvození vztahu dle J. Nadie a C, A, β jsou konstanty.

Decht'arův a Usipovův model vychází z představy o úloze vakancí, jako důsledku fyzikálního rozrušování materiálu podobné zárodkům natavování materiálu. Rozrušováním materiálu vzniká určité kritické množství zárodků kapalně fáze důsledkem narůstání koncentrace ohnisek natavování. Výsledkem modelu je doba životnosti elektroizolačního materiálu, která je exponenciální závislostí napětí na době do lomu:

$$\tau_p = B \cdot e^{\frac{Q_0}{RT}} e^{-\left(\frac{qV_a\sigma}{2RT} \right)} \quad (4.2)$$

kde τ_p [h] je doba do lomu, V_a [m³] je objem molu atomů, q je koeficient koncentrace napětí v porušované oblasti, Q_0 je aktivační energie samodifuze, T [K] je teplota, σ [Pa] je mechanické napětí, R je univerzální plynová konstanta a B je konstanta.

4.4.2 Modely elektrického stárnutí

Vliv elektrického stárnutí je jedním z nejvýznamnějších faktorů stárnutí elektroizolačních systémů. Přesný mechanismus stárnutí materiálů vlivem působení elektrického pole však doposud nebyl popsán a většina modelů je empirického charakteru. Pro výpočet doby života materiálu, na který působí elektrické pole, jsou používány následující modely:

Mocninný model:

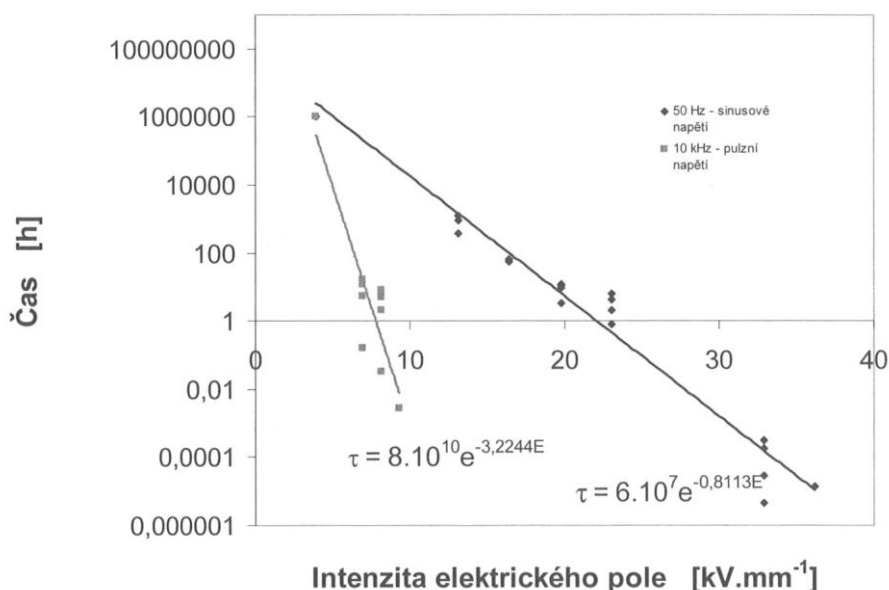
$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (4.3)$$

Exponenciální model:

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad (4.4)$$

kde τ [h] je doba života, E [kV·mm⁻¹] je intenzita elektrického pole, a , k , n , b jsou konstanty určované empiricky.

Tyto modely popisují stárnutí vlivem působení elektrického pole u všech materiálů obecně. Není tedy třeba znát podrobně všechny procesy způsobené působením elektrického pole. Modely nejsou závislé na struktuře materiálu (izolačního systému), konfiguraci elektrod nebo na tvaru elektrického pole. Vztahy jsou pouhé empirické vzorce odvozené pro výpočet doby života materiálu, které podávají dobré výsledky a vypočítané hodnoty doby života materiálů se blíží realitě. Odvozené modely elektrického stárnutí se ale nehodí pro nízké hladiny intenzity elektrického pole, jelikož je předpokládána určitá prahová intenzita elektrického pole, pod jejíž hladinou nedochází k ovlivňování procesu stárnutí elektroizolačního materiálu elektrickým polem. Z výše uvedeného vyplývá, že modely elektrického stárnutí jsou vhodné spíše pro výpočet životnosti při pulzním namáhání materiálu elektrickým polem. Na obrázku 4.2 je znázorněno porovnání životnosti materiálu pro dvě hodnoty pulzního namáhání.



Obr. 4.2 Porovnání životnosti izolačního materiálu při střídavém napětí 50 Hz a 10 kHz pulzním napětí dle exponenciálního modelu, převzato z [2]

4.4.3 Modely tepelného stárnutí

Odolnost elektrického zařízení je závislá na odolnosti jednotlivých částí zařízení, které tvoří sériový spolehlivostní řetězec. Ten je závislý i na teplotní odolnosti elektroizolačního materiálu, který musí zajistit dostatečnou odolnost. Jednotlivé druhy elektroizolačních materiálů je třeba zařadit do patřičných tříd teplotní odolnosti a to může být provedeno pouze na základě výsledků zkoušek zrychleného stárnutí. Souvislost mezi délkou testování elektroizolačního materiálu a teplotou, při které materiál stárne, je odvozena z Monzsingerova pravidla:

$$\tau = A \cdot e^{-BT} \quad (4.5)$$

kde τ [h] je délka testování neboli životnost izolace, T [°C] je teplota, A a B jsou experimentálně určené materiálové konstanty. Doba života elektroizolačního materiálu může být určena také za pomoci Arrheniovy rovnice:

$$\tau = a \cdot e^{-\frac{W_a}{RT}} \quad (4.6)$$

kde W_a [eV] je aktivační energie procesu, R je univerzální plynová konstanta, a je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul a T [K] je absolutní teplota. Z předchozího vyplývá, že životnost materiálu je exponenciální funkcí teploty, při které materiál stárne. To znamená, že při zvyšování teploty materiálu exponenciálně klesá jeho životnost.

4.5 Vícefaktorové modely

Pokud budeme na elektroizolační materiál působit současně několika druhy namáhání (např. elektrické nebo tepelné), dojde s velkou pravděpodobností k selhání izolačního materiálu mnohem dříve, než kdybychom působili jednotlivými faktory zvlášť. Současné působení degradačních účinků nemusí být prostým algebraickým součtem jednotlivých typů účinků stárnutí a může k němu docházet v případě kombinace více příčin. Rozlišujeme proto dva druhy interakcí - přímou a nepřímou.

Přímou interakci můžeme zavést v případě, kdy se jednotlivé mechanismy stárnutí přímo ovlivňují v takové míře, že výsledný efekt je diametrálně odlišný od stavu, kdy jednotlivé mechanismy působí jednotlivě. Příkladem takového mechanismu stárnutí je oxidace za působení zvýšené teploty. Samotná zvýšená teplota proces stárnutí a vlastnosti materiálu nijak významně neovlivňuje stejně jako proces oxidace materiálu za pokojové teploty. Za současné přítomnosti kyslíku a zvýšené teploty ale dojde k velmi výraznému zrychlení procesu oxidace a tím k výraznému degradačnímu účinku. Což má za následek snížení životnosti elektroizolačního materiálu.

Nepřímou interakci lze popsat jako stav, kdy nedochází k vzájemnému ovlivnění působících faktorů, ale jsou vzájemně ovlivněny výsledky těchto mechanismů stárnutí. Jako příklad můžeme uvést současné působení mechanického namáhání a elektrického pole. Vlivem mechanického namáhání může dojít ke strukturálnímu porušení materiálu a tím ke zvýšení výskytu částečných výbojů, které způsobí rychlejší proces degradace a stárnutí elektroizolačního materiálu.

Tyto poznatky interakcí mezi jednotlivými faktory ovlivňující degradaci materiálů musíme uvažovat v matematických modelech, kterými popisujeme tyto děje. V současné době je využíváno několik matematických modelů popisující chování elektroizolačních materiálů za současného působení elektrického pole a zvýšené teploty.

4.5.1 Simoniho model

Dle Simoniho modelu je proces stárnutí definován jako postupné zhoršování určité vlastnosti p nezbytné pro funkčnost systému. K selhání elektroizolačního systému tedy dojde v okamžiku dosažení určité limitní hodnoty vlastnosti p . Intenzitu degradace materiálu značíme jako R . Proces stárnutí je tedy možné definovat jako funkci $f(p)$.

$$R = \frac{dF(p)}{dt} \quad (4.7)$$

Hodnota výrazu R je závislá pouze na charakteru všech mechanismů stárnutí a v případě přítomnosti některých interakcí je třeba výraz 4.7 upravit. V průběhu stárnutí materiálu se hodnota vlastnosti p snižuje až do hodnoty limitní p_L související s časem stárnutí,

kde nastává porucha a časový interval končící limitní hodnotou vlastnosti p_L je označován jako doba života τ :

$$\tau = \frac{F(p_L)}{R} \quad (4.8)$$

$$F(p) = R \cdot t \quad (4.9)$$

Výraz R musí respektovat Simonioho odvození modelu stárnutí vycházející z termodynamických teorií. Proto výraz R musíme upravit do podoby termo-elektrického stárnutí:

$$R = A \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot e^{\left(\frac{a+B}{T}\right)} \cdot f(E) \quad (4.10)$$

kde $f(E)$ je obecná funkce vyjadřující vliv elektrického pole, T [K] je teplota a A a B jsou materiálové konstanty. Ze vztahu 4.4, 4.8, 4.9 a 4.10 můžeme odvodit model termoelektrického stárnutí v případě působení elektrického pole:

$$\tau(T, E) = L_0 e^{-B \cdot \Delta\left(\frac{1}{T}\right) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-N}} \quad (4.11)$$

kde L_0 je čas do selhání při pokojové teplotě a $E = E_0$, $N = n - b \Delta\left(\frac{1}{T}\right)$, n je konstanta, $\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}$, T_0 je pokojová teplota a l a b jsou materiálové konstanty.

Simonioho model je lineárním modelem. V praxi se ale lineární průběh stárnutí téměř nevyskytuje a to zejména v oblasti nižšího namáhání materiálů, jelikož většina elektroizolačních systémů je naddimenzována. Tento model je tedy použitelný spíše v oblasti extrémního namáhání a pro určování případného možného přetížení.

4.5.2 Ramuův model

Ramuův model stárnutí je svou podstatou odvozen ze vztahů elektrického a tepelného stárnutí. Jde o model teplotně závislého elektrického stárnutí obecně vyjádřeného jako:

$$\tau(T, E) = c(T)E^{-n(T)}e^{-B\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (4.12)$$

kde jsou platné substituce pro:

$$c(T) = e^{c_1 - c_2\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (4.13)$$

a

$$n(T) = n_1 - n_2\Delta\left(\frac{1}{T}\right) \quad (4.14)$$

kde c_1 , c_2 , n_1 , n_2 , B jsou experimentálně zjištěné konstanty, $\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}$, T je teplota a E je působící elektrické namáhání. Výraz (4.12) je možné zjednodušit zavedením substitucí, kde je následně potřeba určit již jen 4 konstanty.

$$\tau(T, E) = cE^{-\left(n_1 - n_2\Delta\left(\frac{1}{T}\right)\right)}e^{-\tilde{B}\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (4.15)$$

Vztah 4.15, který určuje dobu života lze v grafické podobě znázornit jako graf odolnosti vůči elektrickému a tepelnému namáhání. Je znázorněn dvěma křivkami vyjadřujícími závislost stárnutí materiálu vlivem působení elektrického namáhání za konstantní teploty a závislost stárnutí materiálu vlivem působení tepelného namáhání za působení konstantní intenzity elektrického pole.

4.5.3 Fallouův model

Stejně jako předcházející modely je i Fallouův model založen na vztazích pro tepelné a elektrické stárnutí a vychází z exponenciálního modelu pro elektrické stárnutí. Z tohoto modelu není možné určit hladinu prahového elektrického namáhání. Životnost elektroizolačního systému dle Falloua je dána vztahem 4.16.

$$\tau = e^{A(E) + \frac{B(E)}{T}} \quad (4.16)$$

tato rovnice je platná pouze za splnění podmínky $E > 0$ a konstanty A a B lze nahradit substitucí ve tvaru:

$$A(E) = A_1 + A_2 E \quad (4.17)$$

a

$$B(E) = B_1 + B_2 E \quad (4.18)$$

kde A_1 , A_2 , B_1 a B_2 jsou experimentálně zjištěné konstanty při laboratorních zkouškách zrychleného stárnutí při konstantní teplotě a můžeme je dosadit do vztahu 4.16 a po jeho úpravě získat vztah:

$$\tau = \tilde{A}_1 e^{\frac{B_2}{T}} e^{-\left(A_2 + \frac{B_1}{T}\right)E} \quad (4.19)$$

kde pro konstantu A platí $\tilde{A} = e^{A_1}$

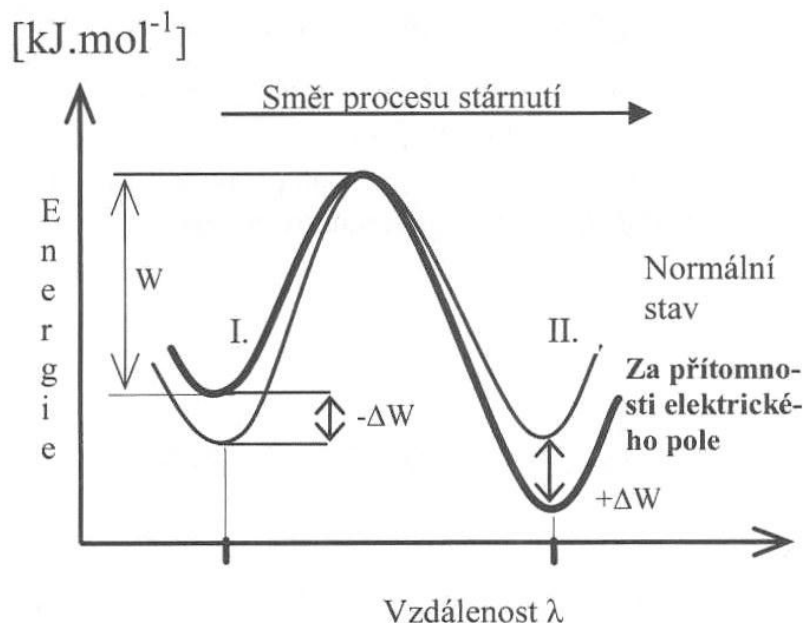
4.5.4 Crineův model

Crineův model je plnohodnotný fyzikální model, kde všechny parametry mají vlastní fyzikální význam. A to na rozdíl od předcházejících modelů, které jsou určeny empiricky a jednotlivé konkrétní charakteristiky izolačních materiálů je vždy potřeba určit experimentálně. Crineův model stárnutí je založen na principu dvojité potenciálové jámy, která od sebe energetickou bariérou odděluje provozuschopný stav od stavu selhání. K tomu, aby se elektroizolační systém dostal do stavu selhání ze stavu provozuschopného, potřebuje dostatečnou energii k překonání energetické bariéry. Pravděpodobnost selhání systému, tedy pravděpodobnost nabytí dostatečného množství energie k překročení bariéry udává Maxwell-Boltzmannovo rozdělovací zákon. Tato pravděpodobnost je ovlivněna elektrickým polem, které značně deformuje energetickou bariéru. Výška energetické bariéry se působením elektrického pole na straně provozuschopného stavu snižuje o hodnotu ΔW a na straně poruchy se naopak zvyšuje. Tím dochází ke zvyšování pravděpodobnosti přechodu ze stavu

provozního (I.) do stavu poruchového (II.). To je vyjádřeno obrázkem 4.3. Doba života elektroizolačního materiálu je podle Crinea doba potřebná k přechodu přes energetickou bariéru. Střední doba života elektroizolačního materiálu je dle Crinea určena střední dobou přechodu energetické bariéry a tu je možné vyjádřit Maxwell-Boltzmannovým rozdělovacím zákonem a pomocí zákonů termodynamiky:

$$\tau = \left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta W}{k_B T}} \cosh \left(\frac{e_p \lambda E}{k_B T} \right) \quad (4.20)$$

kde h je Planckova konstanta, k_B je Boltzmannova konstanta, ΔW [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$] je volná aktivační energie, λ je vzdálenost mezi oběma stavy (šířka energetické bariéry) a e_p je elektrický náboj částic který ovlivňuje proces stárnutí. Použití Crineova modelu je v praxi málo využívané. Parametry λ a ΔW nejsou blíže specifikovány a proto je určení životnosti elektroizolačního systému na základě tohoto modelu velmi obtížné.



Obr. 4.3 Model stárnutí elektroizolačního materiálu jako dvojité potenciálové jámy, převzato z [2]

4.5.5 Model kombinovaného tepelného a elektrického stárnutí pulzním napětím

Jedná se o model kombinující elektrické a pulzní namáhání, který je odvozen z exponenciálního modelu 4.4.

$$L(V, T, f) = K f^{\left(m_1 + \frac{m_2}{V}\right)} e^{\left(\frac{A}{V} + \frac{B}{T}\right)} \quad (4.21)$$

kde L [h] je životnost při pravděpodobnosti 63,2 %, V [V] je amplituda pulzního napětí, T [K] je teplota a f [Hz] frekvence. Parametry K , A , B , m_1 a m_2 jsou určovány experimentálně. [2,9]

5 Životnost a spolehlivost elektroizolačních materiálů

Na elektrotechnická zařízení a jejich podsystemy je v dnešní době kladen veliký tlak z pohledu životnosti, spolehlivosti a ekonomické přijatelnosti. Bezporuchový chod těchto zařízení je podmíněn bezchybností jejich vnitřního systému, který je možné znázornit jako sériový spolehlivostní řetězec. Bezporuchový chod zařízení a zajištění takového stavu je v průběhu jejich provozu testován a zprostředkován diagnostickými systémy. Takový úkol může být někdy pro diagnostický systém obtížně splnitelný a proto řešení, které může být za pomoci dnešních znalostí a zkušeností uplatněno je odhad provozní spolehlivosti zařízení (diagnostikovaného objektu) spojené s odhadem jeho zbytkové životnosti.

Spolehlivost je definována jako obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce ve stanoveném časovém intervalu při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase stanoveném technickými podmínkami. Spolehlivost je nadřazenou komplexní vlastností a zahrnuje dílčí spolehlivostní vlastnosti. Těmi jsou např. bezporuchovost, životnost, udržitelnost, skladovatelnost a jiné.

Životnost obecně můžeme definovat jako schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce po stanovenou dobu do mezního stavu za stanovených podmínek (předepsaná údržba a opravy). Číselně lze životnost objektu vyjádřit např. střední dobou používání, technickým životem se stanovenou pravděpodobností nebo středním technickým životem. Životnost je tedy doba provozu vyjádřená počtem provozních hodin, nebo cyklů, počtem zatížení, počtem funkcí nebo kalendářní dobou.

Výrobce elektrotechnických materiálů a izolačních systémů musí zajistit číselné vyjádření parametrů spolehlivosti, aby mohl zákazníkovi optimálně naddimenzovat výrobek, případně navrhnout optimální proces jeho výroby. Vlastní spolehlivost objektu je funkcí předvýrobních a výrobních procesů. K zajištění spolehlivosti musíme zabezpečit kvalitu vstupního materiálu, ze kterého se následně vyrábí a je nutné průběžně sledovat změny parametrů spolehlivosti ve stanovených kontrolních mezioperačních intervalech. Veškeré materiály použité v izolačních systémech mají rozptyl svých vlastností a podobně se chovají také parametry degradačních účinků. Při dimenzování proto nestačí znát pouze střední hodnotu parametrů. Pokud by bylo např. dovolené namáhání materiálu určováno ze střední hodnoty např. elektrické pevnosti, nebyla by číselně zabezpečena spolehlivost systému.

Je tedy výhodnější stanovit pravděpodobnost, se kterou je mez elektrické pevnosti větší nebo rovna hodnotě degradačního faktoru, který na izolační materiál působí. Spolehlivost každého prvku, i systému samotného, je dána vlastní spolehlivostí materiálu v okamžiku, kdy opustí výrobu a spolehlivostí v jeho funkci. Uvedeme tedy nejdříve vlastní spolehlivost daného prvku systému v čase $t=0$:

$$P(t=0) = 1 - F(t=0) \quad (5.1)$$

kde $F(t=0)$ je poruchovost (pravděpodobnost, která je funkcí rozdílu mezní pevnosti sledovaného prvku a působícího zatížení). Výsledná spolehlivost Q_V systému je dána součinem spolehlivostí jednotlivých prvků systému vyjádřené pravděpodobnostmi bezporuchového stavu při působení jednotlivých degradačních faktorů:

$$Q_V = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n \quad (5.2)$$

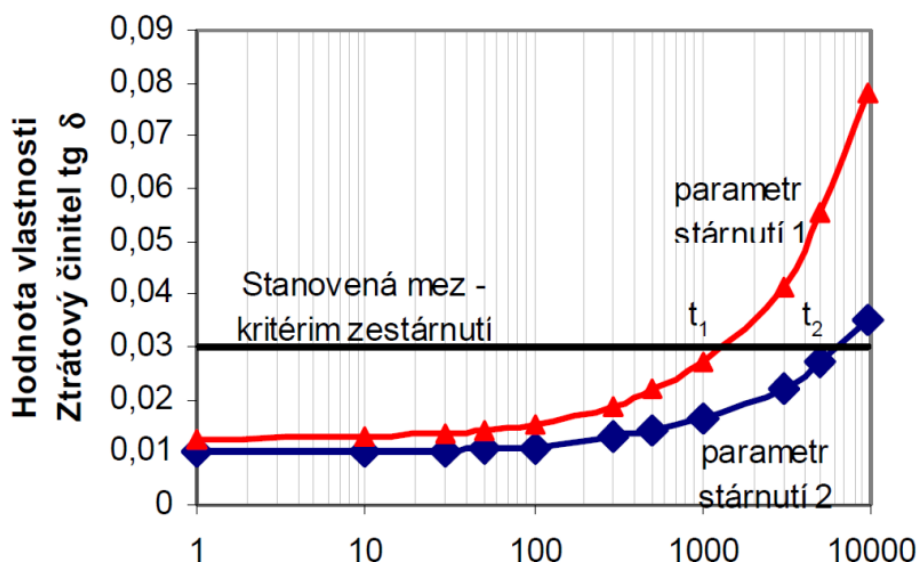
Určení provozní spolehlivosti elektroizolačního systému vychází z toho, že určení okamžité spolehlivosti $Q(t)$ je funkcí spolehlivosti vložené do systému při jeho výrobě $Q(t=0)$. Okamžitá spolehlivost systému je určena jeho aktuálním stavem a modelovými stavy. Okamžitý stav systému ovlivňují různé degradační účinky působící v daný okamžik na sledovaný izolační systém. Účinky těchto vlivů vyjadřujeme pomocí stanovených součinitelů K . Okamžitý stav izolačního systému (jeho provozní spolehlivost) je tedy:

$$Q(t) = Q(t=0) \cdot gK(0) \quad (5.3)$$

kde gK je funkce vlivů působících na degradaci systému. Součinitel K udává superpozici všech vlivů působících na daný izolační systém a lze ho vyjádřit jako průnik výstupu diagnostických měření v provozu a laboratorních zkoušek na vzorcích materiálu. Na základě znalosti zůstatkové spolehlivosti systému můžeme určit jeho zbytkovou životnost [14,15,16].

Pro zjištění zbytkové životnosti elektroizolačního systému je potřeba daný objekt testovat. Testy mohou být prováděny jen na části materiálu, součásti elektroizolačního systému, prototypu či modelu původního zařízení nebo na kompletní sestavě a jsou vztaženy k provozním podmínkám. U izolačních materiálů se při diagnostice zjišťuje zejména doba

do poruchy, provozní doba bez poruchy nebo doba života zakončená překročením, nebo dosažením kritéria koncového bodu. Koncovým bodem se rozumí hodnota daného sledovaného mezního provozního parametru elektroizolačního systému. To je znázorněno na obrázku 5.1. Dobu života nebo zbytkové životnosti můžeme tedy určit dle překročení nebo přiblížení k takové mezní hodnotě. Ke zjišťování zbytkové životnosti elektroizolačních materiálů používáme parametry vlastností materiálů, jako je izolační odpor, ztrátový činitel nebo sledujeme další děje jako například částečné výboje [4].



Obr. 5.1 Příklad použití parametru koncového bodu při stanovení zbytkové životnosti, převzato z [4]

6 Diagnostika elektroizolačních systémů

Stupňující se požadavky na přesnost, spolehlivost a kvalitu všech elektrotechnických zařízení, snížení jejich výrobních a provozních nákladů a důraz na maximální šetrnost k životnímu prostředí nesou zvyšující se nároky na získávání informací o elektrických zařízeních ve všech jejich úrovních. Tyto požadavky splňuje disciplína, kterou nazýváme elektrotechnologická diagnostika a úzce souvisí se vším, co se procesů výroby elektrických zařízení a následného provozu týká. Slovo diagnostika má původ v řeckém slově *diagnosis* znamenající rozpoznání. Pro hodnocení životnosti a spolehlivosti elektroizolačních systémů spatřujeme dopady diagnostiky hlavně ve zjišťování příčin poruch, ke kterým dochází během provozu zařízení. Vzniklé poruchy jsou zaznamenávány a uchovávány v databázích. Na základě jejich vyhodnocování jsou při následných poruchových stavech diagnostickým systémem určeny místa poruchy, způsoby jejich opravy a možnosti jejich předcházení. Z výše uvedeného může být diagnostikou na základě matematických a fyzikálních modelů určena zbytková životnost zařízení, případně některého z jeho systému.

Diagnostikovaný objekt je obecně považován za systém, který je tvořen propojením funkčních prvků a podsystémů. Ty můžeme považovat za soubor n prvků, na které působí množina vnějších vlivů a podnětů, na které systém reaguje množinou svých reakcí – výstupních signálů. Diagnostikované objekty jsou v průběhu svého života převážně v bezporuchovém stavu, kdy jsou schopny vykonávat všechny funkce a výstupní signály jsou zcela v tolerančních mezích. Opakem toho je poruchový stav, kdy výstupní signály jsou mimo toleranční meze a objekt není schopen plnit svou funkci. V případě, kdy objekt má výstupní signály diagnostického zařízení mimo meze tolerance, ale je schopen plnit svou funkci hovoříme o provozuschopném stavu. Podmínky pro provoz zařízení diagnostikovaného objektu považujeme převážně za normální. To jsou takové podmínky, které respektují požadavky výrobce. Dojde-li v takové situaci k poruše, znamená to, že je zapříčiněna špatnou konstrukcí nebo provedením objektu. Je-li objekt provozován mimo podmínky stanovené výrobcem, jedná se o nenormální podmínky a poruchy mohou být zapříčiněny vnějšími vlivy. Diagnostikované objekty můžeme z hlediska jejich struktury dělit na dvě skupiny:

- *Objekty s nepřístupnou strukturou* mají diagnostickým systémem sledované pouze patřičné signály na vstupu a výstupu. U těchto objektů nejsou sledovány

procesy ve vnitřní struktuře a zajímají nás pouze procesní vlastnosti určující chování a stav diagnostikovaného objektu.

- *Objekty s přístupnou strukturou* mají diagnostickým systémem sledované i děje uvnitř jejich struktury. Kontrolujeme také vstupy a výstupy jednotlivých prvků diagnostikovaného objektu, které kvalitativně nebo kvantitativně popisují fyzikální, chemické případně jiné parametry vlastností objektu.

Nositel informace technického stavu diagnostikovaného objektu je diagnostická veličina, která může transformovat do měřitelného stavu parametry, které nejsou přímo měřitelné. Diagnostikovaný objekt je určen svými stavy, které jsou určeny a zaznamenány diagnostickými signály. Funkční blok, který převádí množinu funkčních stavů na množinu funkčních signálů, nazýváme **diagnostický systém**. S jeho pomocí jsme schopni diagnostické signály měřit a získat tak data o stavech diagnostikovaného objektu. Pro správnou funkci diagnostického systému je potřeba splňovat následující procesní, přístrojové podmínky a požadavky:

- *Potřebné přístrojové vybavení* je tvořeno souborem měřidel s vhodnými převodníky potřebné pro převod množiny stavů objektu na množinu signálů, které měříme a zaznamenáváme. Soustava čidel by měla být součástí diagnostikovaného objektu, neboť je potřeba provádět diagnostiku již při samotné konstrukci elektrotechnického zařízení.
- *Model diagnostikovaného objektu* pro simulaci všech provozních stavů, které mohou nastat při výrobě a provozu diagnostikovaného objektu. Při přípravě modelu shromáždíme charakteristiky daného diagnostikovaného objektu, jeho charakteristické stavy a matematické vyjádření průběhů jeho parametrů. Takovéto modely mohou být fyzikální (jedná se většinou o přímé kopie objektů nebo o části objektu, na kterých je diagnostika prováděna) nebo matematické. Základem modelu je blokové schéma, na kterém jsou přehledně znázorněny všechny vstupní a výstupní signály funkčních bloků objektu.
- *Přístup k řešení diagnostikovaného objektu*. Ten může být *fenomenologický*, což znamená, že při diagnostice nás zajímají pouze reakce objektu na vstupní diagnostické signály. Druhý přístup je *strukturální*, kdy zkoumáme děje ve struktuře diagnostikovaného objektu. Z toho vyplývá, že při strukturálním přístupu získáváme

mnohem více informací o objektu s menším rozptylem hodnot. Takový přístup je ale mnohem složitější a nákladnější na přístrojové vybavení a jeho obsluhu.

- *Rozhodnutí o typu zkoušky*, která může být *destruktivní* nebo *nedestruktivní*. Destruktivní zkouška má výbornou vypovídající hodnotu, je ale náročná na spotřebu experimentálního materiálu, který je zkouškou znehodnocen. Naproti tomu nedestruktivní zkoušky lze opakovat, jelikož testovaný materiál zůstává téměř nepoškozen. Nedestruktivní zkouška proto může být použita pro on-line diagnostiku.
- *Volba režimu*, jakým bude diagnostika postupovat. Lze použít on-line diagnostiku, která je prováděna za plného provozu zařízení a funkčnost diagnostikovaného systému je na tomto režimu téměř nezávislá. Možná je také off-line diagnostika, která je prováděna při nutném odstavení zařízení. Při tom je ve většině případů zařízení rozebráno nebo je proveden určitý zásah do diagnostikovaného objektu.
- *Stanovení postupu a znalostního potenciálu* spočívá v určení vlastních diagnostických operací, jejich optimalizaci a stanovení jednotlivých kroků diagnózy a neméně důležité je také určit pracovníky, kteří mají potřebné znalosti a zkušenosti.

6.1 Diagnostika on-line a off-line

Rozlišujeme dva způsoby provádění zkoušek na diagnostikovaném objektu. Ty jsou závislé na tom, zda je diagnostika prováděna na objektu, který je mimo provoz nebo v opačném případě na objektu, který je v provozu. V prvním případě se jedná o testovací off-line diagnostiku. Ve druhém případě je prováděná zkouška nazývána jako on-line funkční diagnostika. Pro obecný popis obou způsobů sestavíme přenosovou funkci a použijeme jednoduchý model diagnostikovaného objektu. Přenosová funkce vyjadřuje závislost výstupních funkcí $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ realizovaných diagnostikovaným objektem na jeho vstupních proměnných $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ a vnitřních stavech $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ v čase t . Pro bezporuchový stav platí:

$$Y = \psi(U, X_p, t) \quad (6.1)$$

kde X_p je počáteční hodnota stavů diagnostikovaného objektu.

Pro i -tý poruchový stav platí:

$$Y_i = \psi^i(U, X_p^i, t) \quad (6.2)$$

Na diagnostikovaném objektu provádíme kontroly $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ při kterých působí vlivy kontrol. Dílčí kontrola k_j a vliv α_j určený vstupními proměnnými U_j v čase t s počáteční hodnotou X_p . Reakce objektu na dílčí kontrolu k_j je dána sestavou měřících bodů $\{\gamma\}$ a výsledkem dílčí kontroly závislým na stavu objektu R_j^i . Výsledek dílčí kontroly, který je funkcí vlivu j , lze obecně zapsat jako sled $\{\gamma\}_j$ rozměrných vektorů:

$$R_j^i = \psi^i(\alpha_j \{\gamma\}_j) \quad (6.3)$$

kde pro bezporuchový stav platí:

$$R_j = \psi(k_j) \quad (6.4)$$

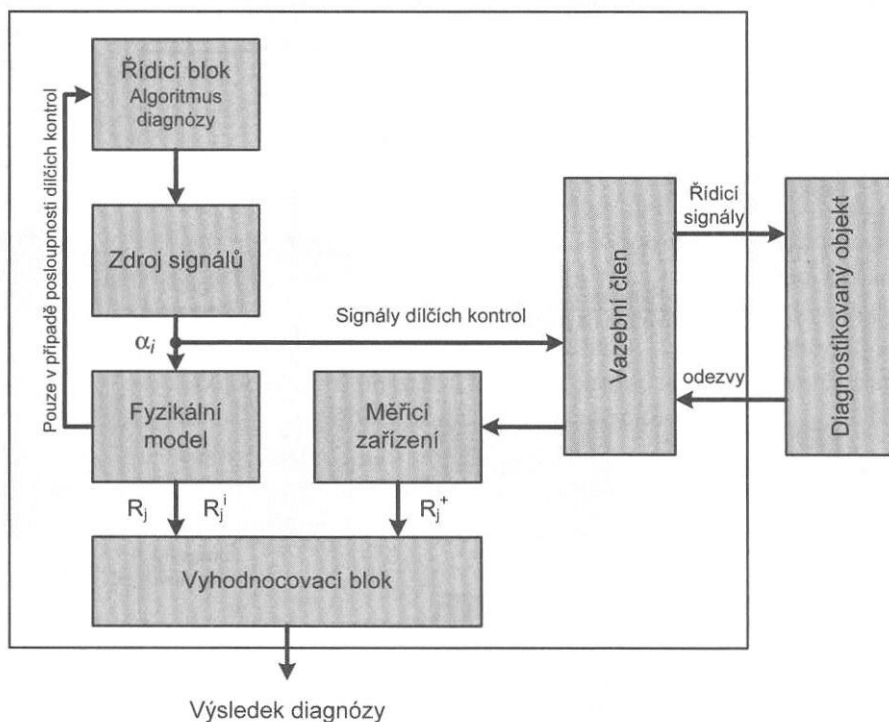
a pro objekt v i -tém poruchovém stavu:

$$R_j^i = \psi^i(k_j) \quad (6.5)$$

6.1.1 Off-line diagnostika

Schéma off-line diagnostiky je uvedeno na *obr. 6.1*. V řídicím bloku je uložen algoritmus diagnózy. Podle jeho příkazů jsou zdrojem signálu generovány signály dílčích kontrol ve sledu, který odpovídá sledu algoritmu diagnózy. Zdroj signálu se pak přes vazební člen předává do diagnostikovaného objektu nebo do fyzikálního modelu diagnostikovaného objektu. Při kontrole stavu testovaného objektu realizuje fyzikální model funkci dle rovnice 6.4 představující množinu signálů $\{R_j\}$ a poruchový výrok dle rovnice 6.5 zastoupený množinou $\{R_j^i\}$. Tyto informace z fyzikálního modelu postupují do vyhodnocovacího bloku. Diagnostikovaný objekt reaguje na signály dílčích kontrol α_i a ze skutečných výsledků dílčích kontrol $\{R_j^+\}$ postupují informace přes vazební člen do měřícího zařízení, ze kterého jsou

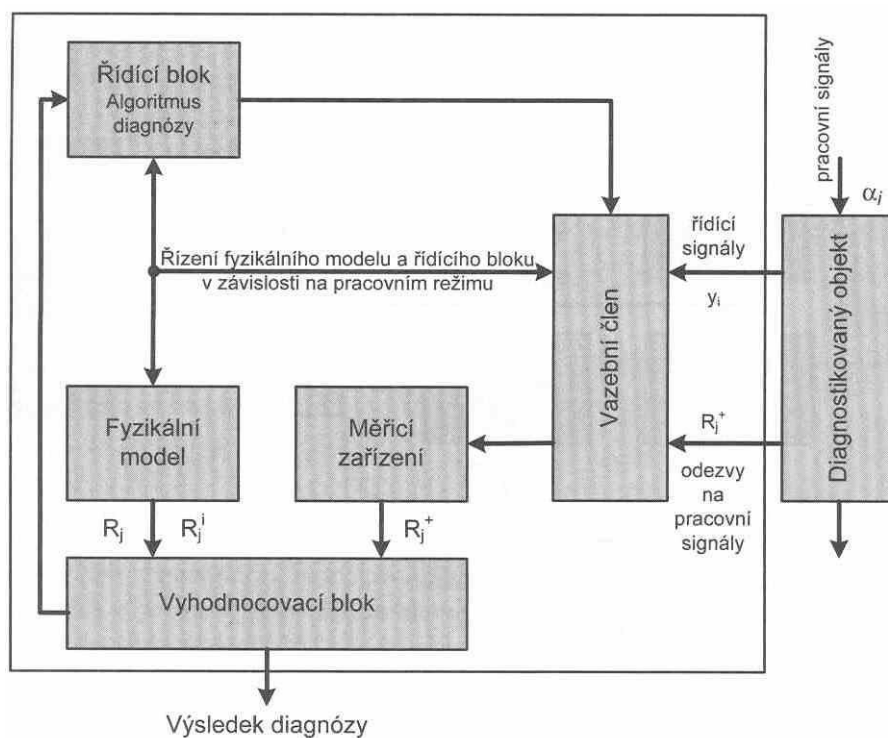
výsledky posílány do vyhodnocovacího bloku. V tom se porovnávají možné výsledky z fyzikálního modelu se skutečnými výsledky a následně je na základě porovnání stanovena konečná diagnóza.



Obr. 6.1 Schéma off-line diagnostiky, převzato z [2]

6.1.2 On-line diagnostika

Na obrázku 6.2 je znázorněno schéma on-line diagnostického systému. Na vstup diagnostikovaného objektu přicházejí provozní signály α_i a do diagnostického systému jsou přeposlány jako řídicí signály y_i a odezvy objektu na pracovní signály $\{R_j^+\}$. Vyhodnocovací blok porovnává výsledky dílčích kontrol s možnými výsledky vygenerovanými fyzikálním modelem. Výsledek diagnózy je určen na základě jejich porovnání.



Obr. 6.2 Schéma on-line diagnostiky, převzato z [2]

6.2 Možnost předpovědi chování diagnostikovaného objektu

Pokud je nám znám současný stav diagnostikovaného objektu a předchozí vývoj jeho stavu, můžeme přejít k další fázi diagnostiky a to k předpovědi budoucího chování objektu a vývoje jeho parametrů. Pokud poruchový stav uvažujeme jako jev, který nastal postupným zhoršováním jeho parametrů, jedná se o postupnou poruchu. Na základě znalostí průběhu změny stavu objektu můžeme předejít další případné poruše. Úkolem předpovědi poruch je tedy za pomoci dostupných prostředků určit zhoršení stavu objektu a tím předejít nečekané poruše. Pokud je stav diagnostikovaného objektu určen parametrem $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)$, pak ho lze vyjádřit v závislosti na čase jako:

$$x_i = \varphi_i(t) \quad (6.6)$$

Dle obrázku 6.3 jednotlivým časovým okamžikům provozu diagnostikovaného objektu $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ náleží určité hodnoty stavu, každému diskrétnímu časovému

okamžiku t_1, t_2, \dots, t_n pak odpovídá určitá velikost zjištěného stavu diagnostikovaného objektu. Pro vyhodnocení předpovědi chování objektu hledáme nejprve vývin stávajícího stavu diagnostikovaného objektu a s ním i náležitého procesu. Předpovídání budoucího chování objektu se dělá na základě modelů vývoje procesu. Pro následnou analytickou předpověď budoucího chování objektu uvažujeme pouze jeden sledovaný parametr x , který se mění podle funkce $x(t)$. Předpověď změny stavu diagnostikovaného objektu bude daná předpovědí změny funkce:

$$x(t) = \varphi(t) \quad (6.7)$$

Sledovaná funkce nabývá v oblasti T_1 hodnot $x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_k)$, kde t_0, t_1, \dots, t_k patří do oblasti T_1 a platí že $t_0 < t_1 < \dots < t_k$. Na základě známých hodnot $x(t_i)$ je třeba předpovědět hodnoty funkce $x(t_{k+1}), x(t_{k+2}), \dots, x(t_{k+m})$ pro okamžiky $t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_{k+m}$ kde platí $t_{k+1} < t_{k+2} < \dots < t_{k+m}$ a jsou z intervalu T_2 která znázorňuje oblast budoucích hodnot předpovídaných jednotlivých časových okamžiků.

Předpověď chování diagnostikovaného objektu je předpovědí změny parametru x_j vyjadřujícího stav zařízení, který v určitém okamžiku dosáhne kritické hodnoty x_i^{kr} . Předpověď je odvozena ze směrnice:

$$x_i' = [x_i(t_k) - x_i(t_{k-1})] / t_k - t_{k-1} \quad (6.8)$$

a rovnice:

$$x_i(t_k + \tau) = x_i(t_k) + x_i' \tau \quad (6.9)$$

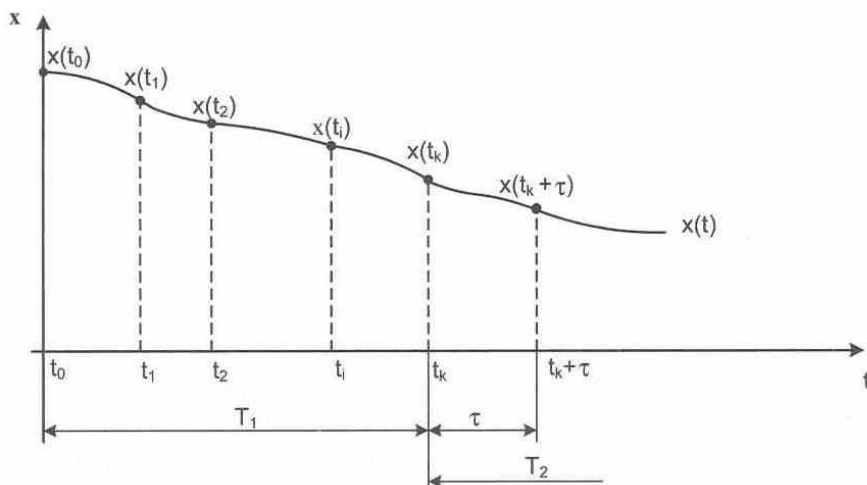
kde τ je následující časový interval. Pro dosažení kritické hodnoty x_i^{kr} předpokládáme čas:

$$t_k + \tau = [x_i^{kr} - x_i(t_k)] / x_i' \quad (6.10)$$

Pro určení pravděpodobnosti budoucího chování diagnostikovaného objektu je potřeba na základě známých hodnot $x(t_i)$, kdy ti je z období T_1 , stanovit pravděpodobnost, že funkce $x(t)$ nepřesáhne mez dovolených hodnot:

$$P(x) \left\{ |x(t_{k+m}) - x_{nom}(t)| \leq \xi_{dov} \right\} \quad (6.11)$$

kde $x(t_{k+m})$ jsou hodnoty zkoumaného parametru v okamžicích t_{k+m} z oblasti T_2 , $x_{nom}(t)$ je nominální hodnota parametru, ξ_{dov} je povolená odchylka $x(t)$ v oblasti T_2 . Předpovídání chování diagnostikovaného objektu spočívá ve sběru dostatečného množství údajů o sledovaných parametrech vyjadřující provozuschopnost a jeho vyhodnocením. Tím se získá přehled o trendu změny sledovaného parametru a přesném stanovení závislosti funkce $x(t)$ na vhodném kroku předpovědi [2].



Obr. 6.3 průběh časové závislosti sledovaného parametru, převzato z [2]

6.3 Elektrické diagnostické metody

6.3.1 Měření absorpčních a resorpčních charakteristik

Diagnostika elektroizolačního systému založená na principu absorpčních a resorpčních charakteristik je principiálně měření nabíjecího a vybíjecího proudu, procházejícího diagnostikovaným objektem – vzorkem. Na jejich základě můžeme určovat izolační odpor R_x , polarizační indexy p_{i1} a p_{i10} , redukované resorpční křivky (RRK) a velikost ploch pod absorpčními a resorpčními křivkami.

Izolační odpor je poměr stejnosměrného napětí přiloženého na diagnostikovaný objekt a celkového proudu v definovaném čase po připojení napětí. Zdroj napětí pro tuto metodu musí být dostatečně stabilní. Pokud je měřený izolační odpor závislý na polaritě napětí, je potřeba to uvést a výsledkem je pak geometrický průměr obou hodnot exponentů.

Nejpoužívanější metodou používanou k měření odporu je metoda voltampérová. Jedná se o přímé odečítání procházejícího proudu I [A] objektem v daném čase při velikosti přiloženého napětí U [V]. Citlivost takového měření je závislá na citlivosti ampérmetru, kde pro velmi kvalitní izolační materiály používáme elektrometr (přístroj s proudovými rozsahy $\leq 10^{-12}$ A s proudovou konstantou elektroměru k [A/dílek] a výchylkou α [dílek]. Odpor R_x [Ω] vypočítáme jako:

$$R_x = \frac{U}{I} = U = k\alpha \quad (6.12)$$

Dalším parametrem, který můžeme získat z absorpční křivky, jsou polarizační indexy. Používají se pro svou dobrou výpovědní schopnost a pro popis stavu materiálu časovou proměnnou. Polarizační indexy nejsou závislé na rozměrech diagnostikovaného objektu. Výpočet provádíme dle:

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{15} + i_{\infty}}{i_{60} + i_{\infty}} \quad (6.13)$$

kde R_{15} [Ω] a R_{60} [Ω] jsou odpory v 60. a 15. sekundě od připojení napětí, i_{15} a i_{60} jsou odpovídající absorpční proudy [A] a i_{∞} je vodivostní ustálený proud [A].

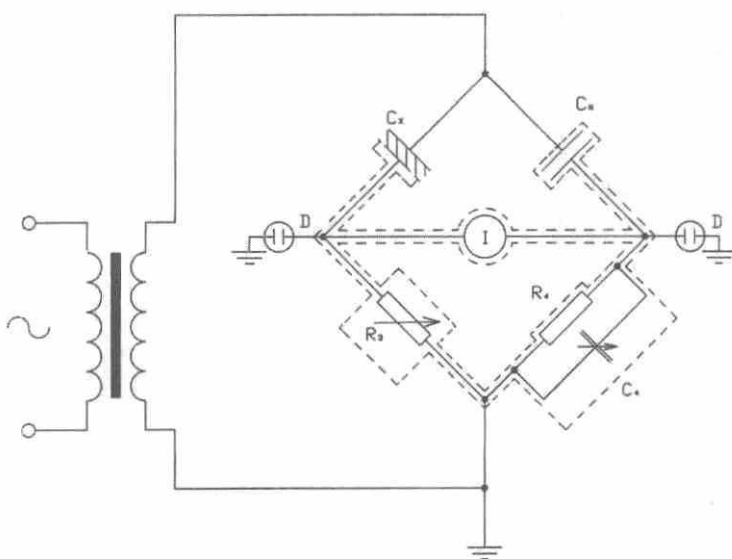
6.3.2 Měření ztrátového činitele a permitivity

Metoda Scheringova můstku

Tato metoda je nejpoužívanější pro měření ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ a schéma zapojení je na obrázku 6.4. Můstek se skládá ze dvou hlavních částí. První z nich je vysokonapěťová a druhá je vyvažovací a je umístěna mimo prostor první části. Galvanické oddělení vysokonapěťové a nízkonapěťové části tvoří diagnostikovaný vzorek a kapacitní normál. Použitý napěťový zdroj musí mít dostatečný výkon a výstupní napětí musí být sinusového průběhu. V uzlech obvodu jsou zapojeny svody přepětí pro ochranu obsluhy při průrazu vzorku. Na diagonále je umístěn nulový indikátor I, ukazující vyvážení můstku, které je prováděno odporovou a kapacitní dekádou R_3 a C_4 . Dekádou R_3 je vyrovnávána kapacitní složka náhradního sériového obvodu a dekáda C_4 vyrovnává odporovou složku. Pro zajištění přesnosti měření musí být nízkonapěťová část můstku stíněna před účinky elektromagnetických parazitních polí. Pro vyrovnaný můstek platí:

$$C_s = C_x = C_n \frac{R_4}{R_3} \quad (6.14)$$

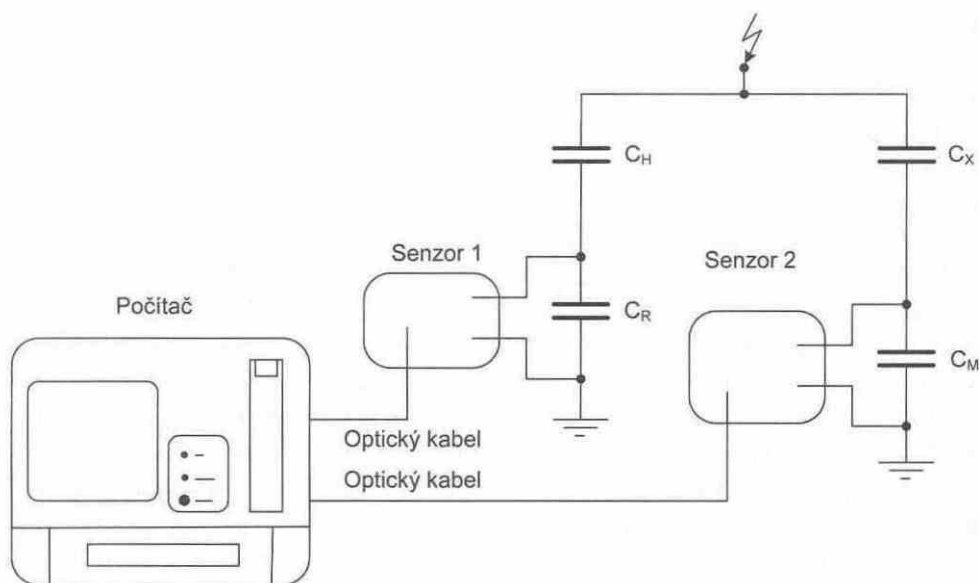
$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s = \omega R_4 C_4 \quad (6.15)$$



Obr. 6.4 Scheringův vysokonapěťový můstek, převzato z [2]

Metoda automatického můstku pro měření dielektrických ztrát

Tato metoda je založena na principu klasického Scheringova můstku a používá se k automatickému zobrazení $tg\delta$ a C_x . Schéma je znázorněné na obrázku 6.5. Větve můstku tvoří kapacitní vysokonapěťové (C_x a C_N) a nízkonapěťové (C_M a C_R) děliče. Na rozdíl od klasických můstkových metod nemusí být tento automatický můstek přesně vyvážen. Zařízením se měří fázový úhel mezi jednotlivými napětími na obou nízkonapěťových impedancích, kde jsou oba kondenzátory hrubě nastaveny tak, aby dělicí poměr mezi větvemi byl stejného řádu. Ztrátový činitel $tg\delta$ je určován na základě naměřeného fázového úhlu mezi napětími, které jsou naměřeny a následně digitalizovány. Tato data jsou v počítači za pomoci Fourierovy transformace zpracována a výsledek vyhodnocen v podobě $tg\delta$. C_x je následně určován z dělicího poměru měřicí větve.



Obr. 6.5 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát, převzato z [2]

6.3.3 Napěťové zkoušky

Napěťové zkoušky patří mezi nejvýznamnější způsoby zjišťování stavu elektroizolačních materiálů. Mají schopnost udávat hodnoty důležitého parametru materiálů, jakým je elektrická pevnost. Tento atribut je velmi důležitý při navrhování a konstrukci všech elektrických zařízení a jejich izolačních systémů. Jedním z cílů správného návrhu izolačního

systemu je zabránění vzniku elektrického průrazu izolace. Ten nastává, pokud je izolační materiál porušen a degradován a takový výboj spojí dvě místa s rozdílným potenciálem. Napětí mezi těmito dvěma místy, mezi kterými dojde elektrickému průrazu, se sníží téměř k nule. Při provádění napěťových zkoušek rozlišujeme zkoušky lišící se druhem přiloženého napětí a to na zkoušky stejnosměrným, střídavým a impulsním napětím. Realizuje se například zkouška přeskokovým (průrazným) napětím, kdy plynule zvyšujeme napětí až do okamžiku přeskoku na zkoušeném objektu. Následně je zaznamenána velikost napětí v čase, kdy k přeskoku (průrazu izolace) došlo.

6.3.4 Měření kapacit

Metoda měření kapacit vychází z předpokladu, že např. vinutí elektrického zařízení, které je v pořádku, má kapacity měřené při různých teplotách a frekvencích stejné. Pokud je ale vinutí např. navlhlé, tak dojde ke změně chování a naměřené kapacity při různých teplotách a frekvencích budou značně rozdílné. Měření se provádí při teplotách 20°C a 80°C a při frekvenci 2 Hz a 50 Hz. Měření při dvou různých teplotách vinutí může být realizováno při odstavování stroje, kdy teplota pomalu klesne z provozní teploty k nižší hodnotě testované teploty.

6.3.5 Metody měření částečných výbojů

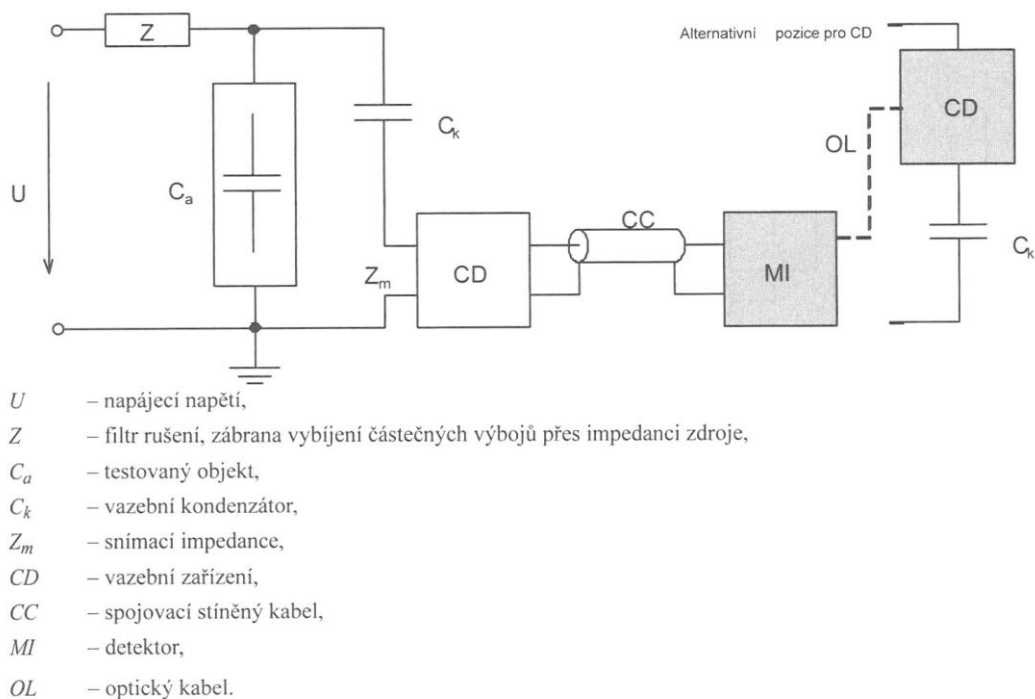
Výbojová činnost v elektroizolačních materiálech je doprovázena řadou jevů. Společně s proudovými impulsy jsou v izolantech vytvářeny výbojovou činností vysokofrekvenční elektromagnetická pole, chemické zplodiny, světelné záření ve viditelném a ultrafialovém spektru, tepelný ohřev okolí výbojové činnosti a zvukové vlny ve slyšitelné a ultrazvukové oblasti. Díky těmto projevům a jejich následkům lze výbojovou činnost v materiálu detekovat, určit rozsah její činnosti a polohu, kde k ní dochází. Metody měření částečných výbojů se rozdělují na metody globální a lokalizační. U globálních metod je cílem komplexní měření částečných výbojů v zařízení a v jeho izolačním systému. Tím získáme ucelený přehled o stavu izolace. Oproti tomu metody lokalizační jsou využívány pro zjišťování zdrojového místa částečných výbojů. Obě tyto metody jsou v praxi kombinovány. Nejprve určíme míru

výbojové činnosti a následně jí lokalizujeme. Pro metody diagnostiky částečných výbojů jsou používány elektrické a neelektrické metody.

Elektrická metoda detekce částečných výbojů přímá

Přímá elektrická metoda detekce částečných výbojů je založena na měření proudových impulzů, kterými jsou výboje provázány. Proudové impulzy jsou tedy jejich měřitelnou reakcí a vhodným měřicím obvodem můžeme stanovit velikost částečných výbojů. Indukčnost napájecího obvodu nedovolí při vzniku částečného výboje v dutince dielektrika hrazení potřebného úbytku energie (náboje) a na svorkách zkoušeného objektu to způsobí pokles napětí, který je úměrný proudovému impulzu výboje. Dorovnání tohoto úbytku napětí zapříčiní vyrovnávací proud v měřicím obvodu a na svorkách měřicí impedance rovnocennou napěťovou odezvu. Takto zachycený impulz napětí je superponován na střídavé napětí zdroje. Je tedy důležité odfiltrování síťové frekvence pomocí filtru. Délka pulzu částečného výboje je závislá na druhu materiálu. Impulzy částečných výbojů v pevných izolačních materiálech mají kratší dobu trvání (v řádech jednotek až desítek ns) než v kapalných izolantech (v řádech jednotek až desítek μ s).

Globální metoda měření je nejrozšířenější metodou pro přímé měření částečných výbojů. Na obrázku 6.6 je uvedeno schéma zapojení pro měření uzemněných objektů nebo objektů s velkou kapacitou. Měřicí impedance se zapojuje do větve vazebního kondenzátoru. Toto zapojení umožňuje ochranu měřicího zařízení proti možnému průrazu zkoumaného objektu.



Obr. 6.6 Zkušební obvod s paralelní snímací impedancí, převzato z [2]

Vysokonapěťový vazební kondenzátor musí mít nízkou indukčnost, vysokou kapacitu a nesmí vykazovat významné částečné výboje v měřicím rozsahu napětí. Je to důležitá součást měřicího obvodu a hradí přechodný pokles napětí při částečném výboji.

Výhodou galvanického měření částečných výbojů je vysoká citlivost, spolehlivost a přesnost měření, bezpečí měřeného objektu bez nutnosti velkého přetěžování a použitelnost pro on-line měření. Bohužel je tato metoda citlivá na okolní rušivé vlivy.

Elektrická metoda detekce částečných výbojů nepřímá

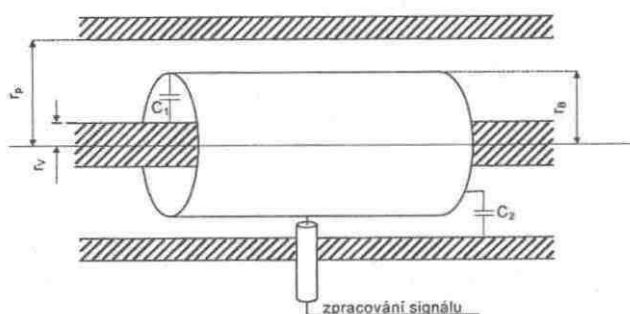
Nepřímé elektrické metody detekce částečných výbojů spočívají v měření vyzařovaných elektromagnetických polí výbojů do okolí. Tato pole jsou detekována vhodnými kapacitními a induktivními sondami a snímači.

Jedna z metod detekce částečných výbojů je založena na použití kapacitního snímače znázorněného na obrázku 6.7. Snímač je koaxiálního tvaru a používá se pro detekci výbojů

v kabelech, kabelových koncovkách a spojkách. Nevýhodou těchto sond je nutnost přerušení silového obvodu při jejich instalaci. Kapacity takového snímače jsou určeny jako:

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln \frac{r_b}{r_v}} \quad C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln \frac{r_p}{r_B}} \quad (6.16)$$

kde l je délka sondy, r_v je poloměr vodiče, r_b je poloměr snímače, r_p je poloměr pláště kabelu.



Obr. 6.7 Schéma kapacitní sondy, převzato z [2]

Neelektrická metoda detekce částečných výbojů

Neelektrické metody detekování částečných výbojů v izolačním systému jsou založeny na snímání jejich projevů. Jsou jimi například chemické zplodiny výbojové činnosti nebo zvukové vlny ve slyšitelném a ultrazvukovém pásmu. Tyto chemické a fyzikální projevy je možné za pomoci vhodných metod detekovat, lokalizovat a kvantifikovat.

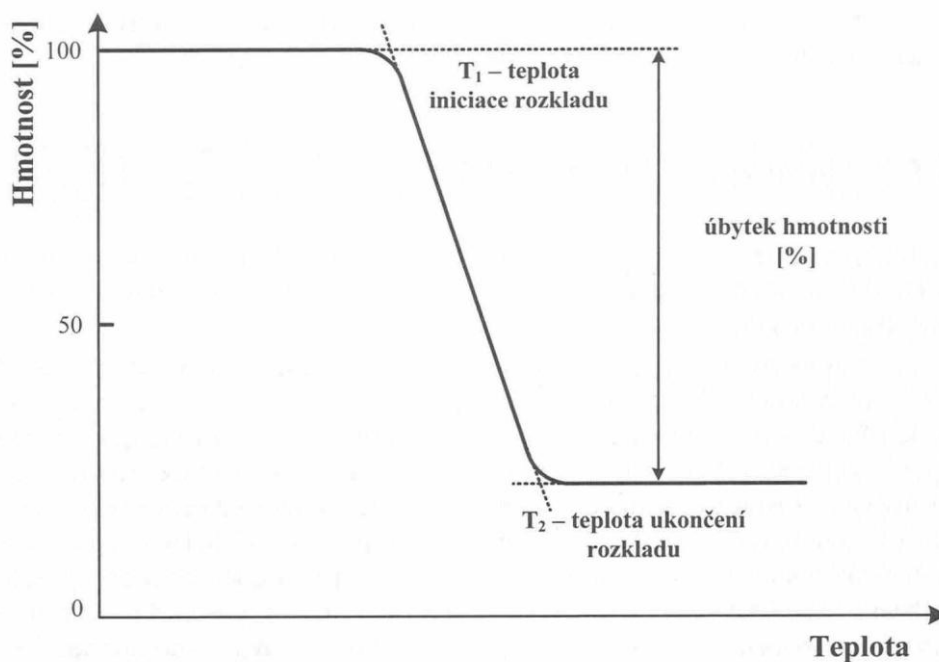
Mezi neelektrické způsoby detekce částečných výbojů patří metoda, založená na rozpoznání obsahu různých plynů vznikajících jako vedlejší produkt při výbojích. Podle druhu plynu a jeho poměru vůči ostatním plynům můžeme analyzovat přítomnost částečných výbojů a rozsah degradace izolačního systému. Mezi plyny, které jsou rozpuštěny např. v izolačním médiu olejových transformátorů, patří: vodík H_2 , methan CH_4 , ethylen C_2H_4 , acetylen C_2H_2 a propylen C_3H_6 . Pro určování obsahu a koncentrace jednotlivých plynů se používá plynová chromatografie.

6.4 Strukturální diagnostické metody

6.4.1 Metody založená na zjišťování hmotnosti

Termogravimetrie TG - Dle definice ICTA je termogravimetrie metoda, při které je měřena hmotnost látky v závislosti na teplotě při probíhajícím řízeném teplotním programu v čase. Je to metoda založená pro přesné měření dehydratace, oxidace a teploty, při které se látka začíná tepelně rozkládat. K její realizaci se používá specifické zařízení zvané termováhy. Jedná se o spojení přesných vah a elektrické píčky. Termováhy dovedou zachytit velmi přesně jakékoliv změny hmotnosti zkoušeného vzorku v závislosti na teplotě. Ta je automaticky regulována teplotním regulátorem. Výstupem termováhy je termogram, neboli závislost hmotnostní změny vzorku (vyjádřené v % nebo v μg) na ose y a teploty ($T [^{\circ}\text{C}]$), případně času ($t [\text{s}]$) vynesené na ose x.

Obecný termogram získaný termogravimetrickou analýzou je znázorněn na obrázku 6.8, který zobrazuje charakteristický jednokrokový rozklad. Ten je určen dvěma teplotami (T_1, T_2). Teplotu T_1 nazýváme teplotou iniciace a jedná se o nejnižší teplotu, kterou je měřicí zařízení schopno rozlišit odklonem od dosud rovné linie. Teplota T_2 určuje teplotu, při které odeznívá úbytek hmotnosti materiálu. Z termogravimetrické křivky jsme schopni zjistit množství rozkladných reakcí, které ve vzorku při daných teplotách začínají a končí a procentuální úbytek (přírůstek) materiálu při konkrétních reakcích. Tato metoda je schopna zaznamenat pouze chemické reakce v materiálu, které jsou doprovázeny změnou hmotnosti. Proto je dobré tuto metodu kombinovat s jinými analýzami (infračervenými spektrometry, plynové chromatografy).



Obr. 6.8 Obecný termogram TG analýzy, převzato z [2]

Plynová chromatografie GC analyzuje, identifikuje a kvantizuje složky plynných směsí. V diagnostice je za její pomoci možné provádět rozbor plynných produktů degradačních procesů materiálů.

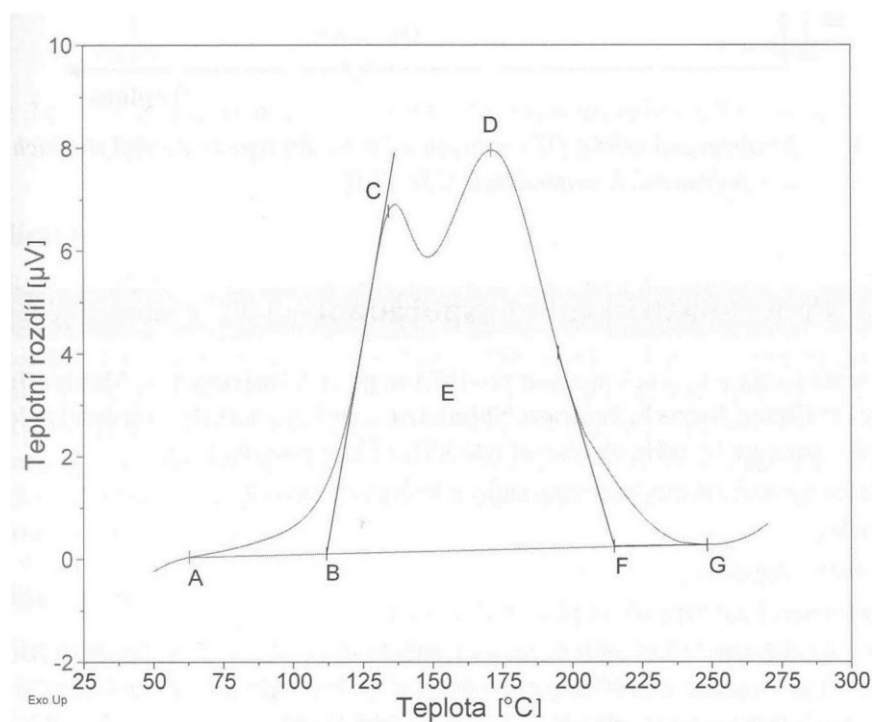
Gelová permeační chromatografie GPC je metoda určená pro analýzu směsí. Například extrakty produktů degradačních účinků a následné kvantitativní analyzování.

6.4.2 Metody založené na měření energie

Diferenční termická analýza DTA je založena na měření teplotního rozdílu mezi diagnostikovaným objektem a tzv. teplotně inertním standardem⁷ jako funkce teploty. Diagnostikovaný objekt a inertní standard jsou zatěžovány teplotním programem, přičemž sledujeme teplotní efekty vzorku, které jsou zapříčiněny fyzikálními a chemickými změnami

⁷ Teplotně inertní standard měření je substance, která nevykazuje žádné fázové přechody v oblasti teplotního rozsahu měření.

při lineárních změnách teploty. Vzorek i inertní standard jsou zahřívány současně v malé pícce, která je schopna velmi rychle reagovat na podmínky teplotní regulace. Inertní standard je většinou tvořen oxidem hlinitým vyžíhaným při teplotě 1000 °C nebo jinými látkami (chromid draselný, nitrid baria, křemen a jiné). Vnitřní energie je zobrazitelná pomocí entalpie a její změny tato metoda dokáže zaznamenat. Při souběžném teplotním programu obou objektů teplota inertního standardu odpovídá teplotě uvnitř pícky, kdežto teplota diagnostikovaného objektu je rozdílná a je závislá na exotermních a endotermních reakcích. Metoda DTA tedy využívá pohlcování nebo odevzdávání energie diagnostikovaným vzorkem a tedy změnu jeho teploty při průběhu každé vnitřní chemické reakce a fyzikální změny. Výstupem měření je termogram obsahující lokální extrémy připadající probíhajícím reakcím. Intenzita reakce je dána plochou pod křivkou lokálního extrému. Pro názornou ukázkou výstupu DTA je na obrázku 6.9 uveden termogram zobrazující exotermní vytvrzovací reakci reaktoplastické pryskyřice.



Obr. 6.9 Ukázka vyhodnocení části lokálního extrému termogramu vytvrzovací reakce, převzato z [2]

kde bod A je odklon od nulové linie, B je teplota počátku reakce, C a D jsou dvě maxima reakce, E je plocha lokálního extrému, F je teplota ukončení reakce a bod G je teplota návratu

křivky k nulové linii. Lokální extrémny na křivkách DTA termogramů znamenají odchylku a překročení teploty teplotně inertního standardu a poukazují na degradaci vazeb v pojivu elektroizolačního materiálu nebo na polymerovou krystalizaci. Křivky termogramů DTA lze popsat matematickou rovnicí:

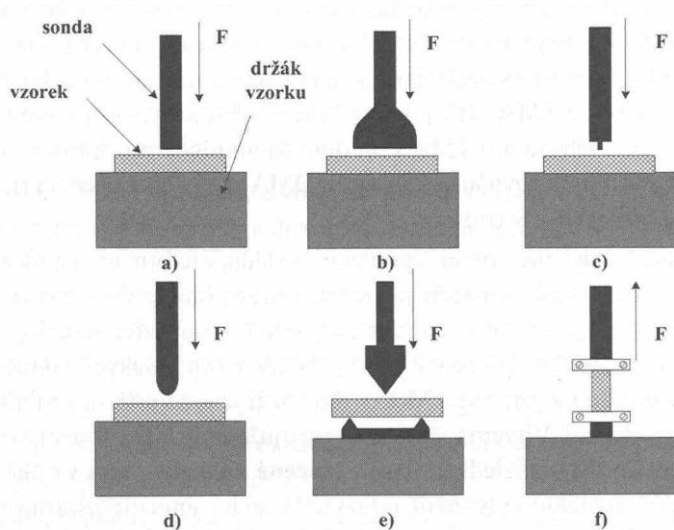
$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + A[\Delta T - (\Delta T)_x] = \frac{\Delta H}{c} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (6.17)$$

kde ΔT [°C] je okamžitá hodnota teplotního rozdílu diagnostikovaného vzorku a inertního standardu, t [s] je čas, A je předexponenciální faktor [s^{-1}], $(\Delta T)_x$ je konstanta rozdílu teplot odpovídající rozdílu napětí termočlánku [°C], ΔH je entalpie [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$], c_p je měrné teplo [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], dx/dt je rychlost reakce [$\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$].

Diferenční skenovací kalorimetrie DSC je podobná metodě DTA, ale měří rozdíl energie vstupující do zkoumaného objektu a teplotně inertního standardu jako funkci teploty.

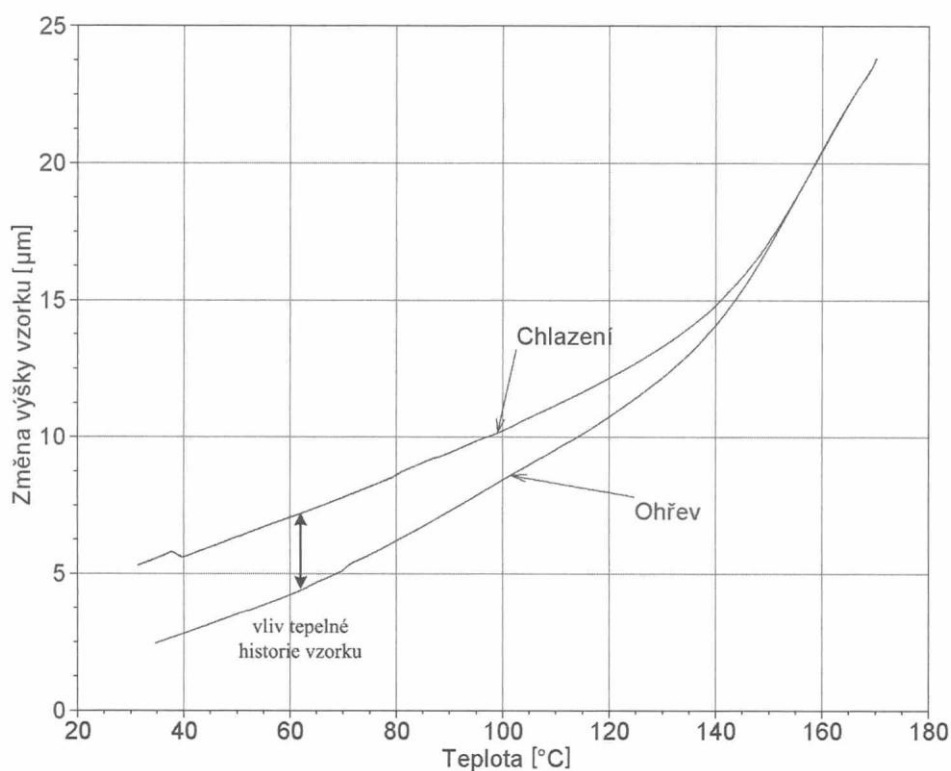
6.4.3 Metody založené na měření mechanických vlastností

Termomechanická analýza TMA je diagnostická metoda, při které je měřena deformace diagnostikovaného vzorku zatíženého neoscilující silou jako funkce teploty při aplikaci teplotního programu. U TMA je možné měřit několika způsoby, které jsou závislé na druhu měřící sondy. Volba vhodného druhu sondy je závislá na požadavcích od měření a vlastnostech vzorku. Na obrázku 6.10 jsou znázorněny některé druhy měřících sond.



Obr. 6.10 Nejneužívanější měřicí sondy pro TMA: a) expanzní, b) makroexpanzní, c) penetrační, d) hemisférická, e) pro tříbodový ohyb, f) tahová, převzato z [2]

Použijeme-li například expanzní sondu s téměř nulovou přítlačnou silou (max. 0,01 N), získáme křivku tepelné roztažnosti materiálu. Ze sklonu křivky lze následně vypočítat hodnotu lineárního koeficientu tepelné roztažnosti v daném intervalu teplot. Nás ale při určování zbytkové životnosti elektroizolačních materiálů bude zajímat možnost určení teploty skelného přechodu T_g daného materiálu. Při této teplotě se amorfni polykrystalické polymery transformují ze sklovitého stavu do stavu kaučukovitého. Hodnota teploty skelného přechodu odpovídá teplotě, při které dojde ke zlomu sklonu křivky expanze. Pokud bude vzorek ohříván nad teplotu skelného přechodu vícekrát, dojde k diferencí teplot T_g mezi jednotlivými ohřevy. Efekt posuvu teploty T_g je zapříčiněn závislostí na teplotní historii diagnostikovaného vzorku. Rozdíl mezi prvním a následným ohřevem vzorku nám tedy může zobrazit teplotní historii vzorku. Na obrázku 6.11 můžeme vidět vliv tepelné historie vzorku a charakteristické zalomení křivky při dosažení teploty skelného přechodu T_g .



Obr. 6.11 Vliv tepelného namáhání epoxidové pryskyřice na průběhu její expanzní křivky, převzato z [2]

Tepelné stárnutí elektroizolačního materiálu se dle obrázku 6.11 projevilo smrštěním vzorku. Při překročení teploty T_g se v průběhu diagnostiky náhle uvolnilo vnitřní pnutí a vzorek se roztáhl. Při následném pomalém ochlazování průběh termodynamické křivky chlazení odpovídá průběhu termodynamické křivky před tepelným namáháním. Rozdíl mezi těmito křivkami lze měřit a posuzovat dle nich stav izolačního materiálu.

Dynamická mechanická analýza DMA je diagnostickou metodou svým principem podobná metodě TMA. U diagnostikovaného objektu je ale zkoumána odezva na oscilující mechanické zatížení sinusového průběhu v závislosti na čase, frekvenci a teplotě [2].

6.4.4 Metody vhodné pro ON-LINE diagnostiku

Měření koncentrace ozonu v chladícím vzduchu strojů a izolačních materiálů spočívá v indikaci výbojové činnosti a lokálního přehřátí izolačního materiálu. Vlivem částečných výbojů dochází k ionizaci vzduchu a ke vzniku ozonu O_3 a oxidů dusíku. Množství těchto rozkladových složek je přímo úměrné intenzitě výbojové činnosti v materiálu a lze je proto použít k indikaci jejich intenzity. Tato metoda je na rozdíl od elektrických diagnostických metod odolná vůči okolnímu rušení. K detekci O_3 používáme indikační média ve formě roztoků a detekčních trubiček, nebo princip absorpce UV záření ozonem [13].

Rozbor příměsí v chladícím vodíku nám dává informaci o stavu izolačního systému na základě rozboru zplodin vznikajících při degračních procesech izolačního systému.

6.4.5 Jiné principy strukturálních diagnostických metod

Infračervená spektroskopie IR je založena na schopnosti různých látek pohlcovat infračervené světlo o různých vlnových délkách.

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací FT-IR je modifikace klasické infračervené spektroskopie IR a využívá matematickou metodu Fourierovy transformace k získání spektrálního záznamu.

Rentgenová fluorescenční spektrometrie XRF je analýzou druhotného záření uvolňovaného při vyražení elektronu dopadajícím rentgenovým zářením [2].

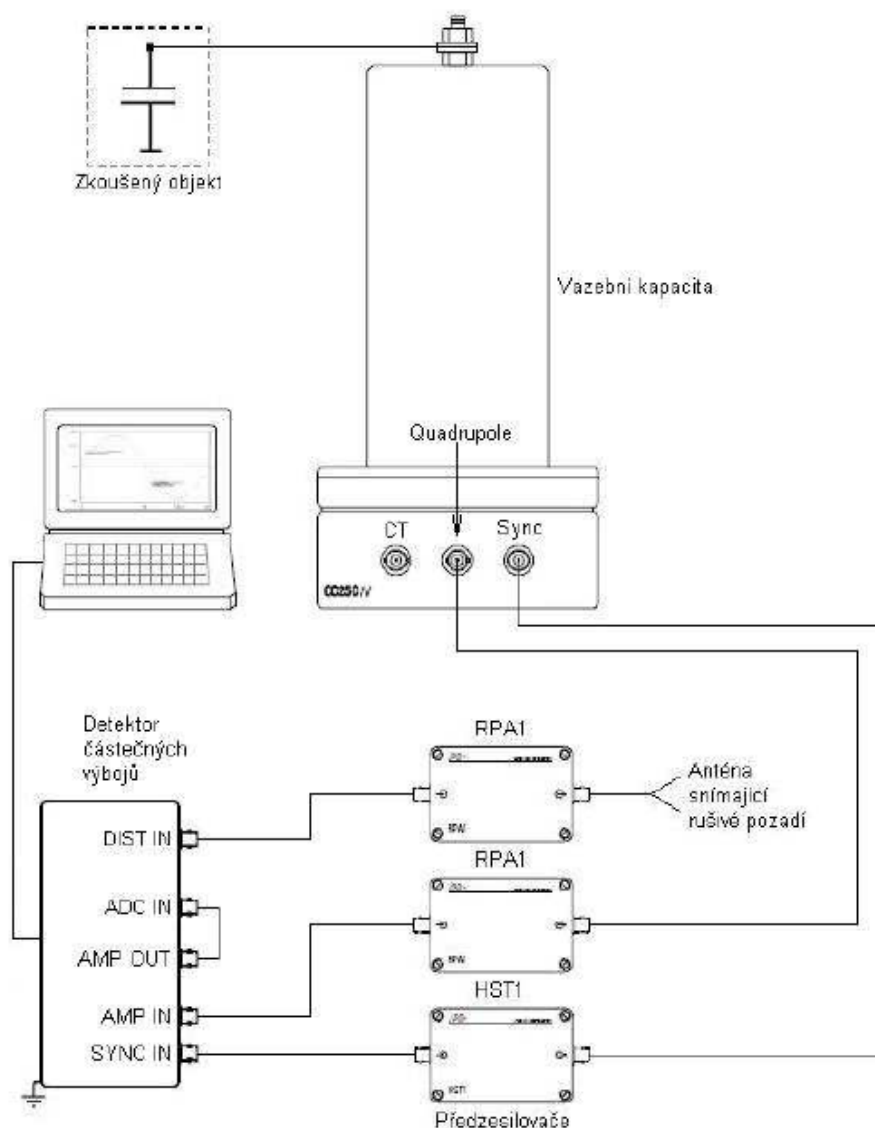
7 Návrh postupů pro zjištění zbytkové životnosti elektroizolačních systémů

7.1 Určování zbytkové životnosti na základě off-line diagnostiky výskytu částečných výbojů v elektroizolačním systému transformátoru.

Pro tuto metodu zjišťování zbytkové životnosti izolačního systému přístrojového transformátoru napětí je možné použít detektor částečných výbojů od firmy Power Diagnostik. Myšlenka této metody je založena na maximální přípustné úrovni zdánlivého náboje částečných výbojů 20 pC u přístrojových transformátorů napětí předepsané normou ČSN EN 60044-2. *Přístrojové transformátory: Induktivní transformátory napětí* a doby života do dosažení kritéria koncového bodu.

7.1.1 Přístrojové vybavení a popis měřícího obvodu

Zkoušený transformátor pro zjištění zbytkové životnosti jeho elektroizolačního systému zapojíme do měřícího obvodu dle metody přímé elektrické metody detekce částečných výbojů s paralelní impedancí podrobněji popsané v kapitole 6.3.5 a znázorněné na obrázku 6.6. Pro tuto konkrétní metodu je digitální detektor částečných výbojů od firmy Power Diagnostik připojen k vazební jednotce přes předzesilovač RPA1, HST1 a koaxiální kabely. Vazební jednotka se skládá z vazební kapacity Bidle (1500pF/150 kV) a snímací impedance kde dělicí napěťový poměr této vazební jednotky je 1:1000. V případě, že měření neprobíhá v laboratorních podmínkách a místnost není elektromagneticky stíněna, je nutné zapojit anténu pro snímání okolního rušení přes modul GATE3 dle schématu zapojení měřícího systému Power Diagnostik na obrázku 7.1. Jako zdroj vysokého napětí je použit bezvýbojový transformátor Micafil. Datový výstup z detektoru částečných výbojů je připojen k PC s ovládacím vyhodnocovacím softwarem.



Obr. 7.1 Schéma zapojení měřícího systému, převzato z [17]

7.1.2 Postup měření

Před započítím samotného měření je nutné provést kalibraci diagnostického systému za použití generátoru kalibračních impulzů nastaveného na úroveň zdánlivého náboje 20 pC. Kalibrace se provádí na obvodu bez napětí a v ovládacím softwaru detektoru částečných výbojů se nastaví úroveň 20 pC. Po kalibraci se generátor kalibračních impulzů odpojí a přejde se k samotnému měření. Zkouška je prováděna postupným zvyšováním předepsaného zkušebního napětí při zkoušce indukovaným napětím. Minimální požadavek na regulaci zdroje vysokého napětí je takový, aby bylo možné zkoušku provést alespoň na jedné

napětíové hladině, kde na (každé) této napětíové hladině je transformátor ponechán po stanovenou dobu. Poté je plynule snížena úroveň napětí na hodnotu předepsanou normou ČSN EN 60044-2. *Přístrojové transformátory: Induktivní transformátory napětí* a měřeno je v daném časovém intervalu. Po skončení měření se napětí sníží plynule až k nule.

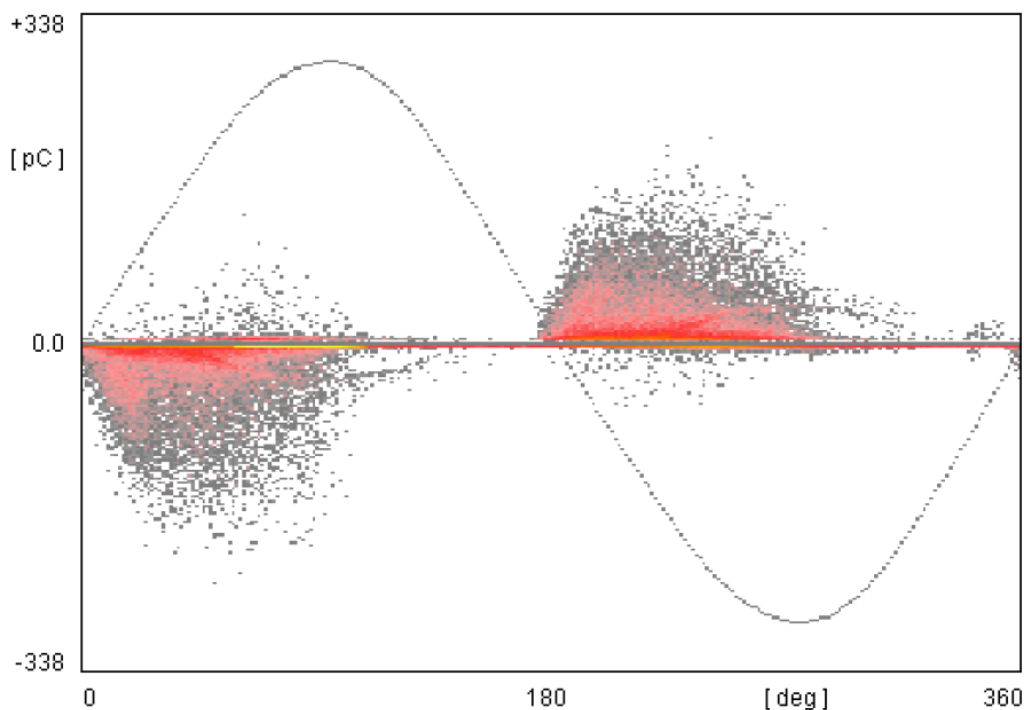
7.1.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Primárním výstupem měření částečných výbojů z digitálního detektoru Power Diagnostik jsou obrazce částečných výbojů. Ty znázorňují rozložení četnosti částečných výbojů v závislosti na fázi zkušební napětí a velikosti částečných výbojů. Příkladem takového obrazce je obrázek 7.2, ze kterého je po následné analýze patrné překročení životnosti izolačního systému přístrojového transformátoru. Rozložení četnosti částečných výbojů je znázorněno barevně. Nejnižší četnost znázorňuje barva šedá, pokračuje se přes červenou, oranžovou a žlutou až do světle modré barvy, která ilustruje nejvyšší stupeň četnosti výskytu. Analýzou četnosti částečných výbojů pomocí ovládacího diagnostického softwaru a porovnáním se vzorky, na kterých bylo provedeno zrychlené stárnutí, případně dosazením naměřených hodnot do některého z modelů degradace elektroizolačních materiálů, lze získat data potřebná pro určení zbytkové životnosti izolačního systému přístrojového transformátoru napětí. Příkladem naměřených hodnot vygenerovaných pomocí ovládacího diagnostického softwaru přístroje Power Diagnostik je tabulka 7.1.

Transformátor: v.č. 003769								
Velikost výbojů	Svorka B				Svorka A			
	40 kV		30 kV		40 kV		30 kV	
	n [-]	n [%]	n [-]	n [%]	n [-]	n [%]	n [-]	n [%]
> 20 pC	22948	6,95	6693	5,87	54517	14,16	19291	12,00
15 - 20 pC	11896	3,61	3190	2,80	19069	4,95	8321	5,18
10 - 15 pC	28798	8,7272	7389	6,48	38121	9,90	15298	9,52
5 - 10 pC	245372	74,36	19878	17,43	246352	64,01	105978	65,94
0 - 5 pC	20966	6,35372	76873	67,42	30891	8,03	11827	7,36
Celkem	329980		114023		384886		160715	

Tab. 7.1 naměřené hodnoty z přístroje Power Diagnostik

Pomocí této metody diagnostiky částečných výbojů v izolačním systému přístrojových transformátorů napětí můžeme v průběhu samotného měření odečítat i zapalovací napětí U_i a zhašecí napětí U_e částečných výbojů. [1,2,17].

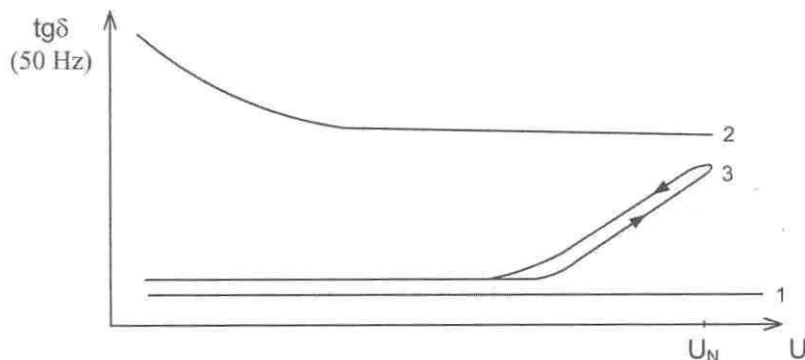


Obr. 7.2 Obrazec částečných výbojů, převzato z [17]

7.2 Určování zbytkové životnosti izolačního systému na základě off-line diagnostiky ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ a kapacity vinutí transformátoru

Parametr ztrátového činitele charakterizuje celkový stav izolačního systému a z jeho velikosti, která je ovlivňována pevnou i kapalnou částí dielektrika, lze zjistit jeho kondici. Ztrátový činitel je charakterizován činnými ztrátami polarizací v dielektriku. S jeho zvyšováním se při provozu izolační materiál více zahřívá vlivem zvýšení dielektrických ztrát a dochází k urychlení procesu stárnutí. Při vlastním hodnocení stavu izolačního systému transformátorů se kapacita nepoužívá. Je nám pouze vodítkem pro indikaci zhoršeného stavu, nebo např. navlhnutí či zestárnutí izolace vinutí. Pokud je totiž vinutí a jeho izolace transformátoru v pořádku, jsou naměřené kapacity při různých

frekvencích a teplotách shodné. Dojde-li ale k např. navlhnutí izolačního systému, dojde ke značným změnám vlastností izolace a k rozdílům naměřených kapacit při rozdílných frekvencích a teplotách.



Obr. 7.3 Průběhy ztrátového činitele v závislosti na napětí, převzato z [2]

Z Obrázku 7.3 jsou patrné tři průběhy ztrátového činitele v závislosti na napětí pro tři stavy izolace:

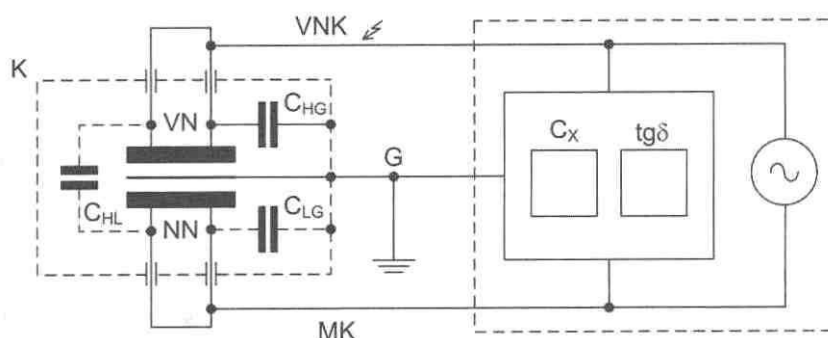
- kvalitní izolace (1) – Nenavlhnutá izolace se ztrátovým úhlem nezávislým na napětí.
- navlhlá izolace (2) – Vysoká hodnota ztrát, obsah vlhkosti v izolaci vede při zvyšování napětí k poklesu ztrátového činitele. To je způsobeno rychlým odváděním činné složky ztrát které jsou tvořeny ionty.
- suchá, kvalitní izolace – Na průběhu ztrátového činitele se projevuje zapalovací a zhášecí napětí částečných výbojů a tím vzniklé ionizace. Proto má průběh v dané části vyššího napětí charakter hystereze.

7.2.1 Přístrojové vybavení a popis měřícího obvodu

Dielektrické ztráty vyjádřené ztrátovým činitelem $tg\delta$ a kapacitu měříme můstkovou metodou při použití střídavého napětí. Měření je prováděno na stejné části vinutí jako při měření izolačního odporu. Nejpoužívanějším můstkem pro metodu měření ztrátového činitele je Scheringův můstek, který je blíže popsán v kapitole 6.3.2 a znázorněn v základní podobě na obrázku 6.4. Při měření je použita hodnota měřícího napětí 10 kV. Pokud je napěťová hladina izolačního systému měřeného vinutí nižší, použijeme nejbližší menší hodnotu zkušebního napětí z řady 0,5 – 1 – 2 – 5 kV. Například je-li hladina napětí izolace

vinutí 6,3 kV, použijeme zkušební měřicí napětí 5 kV. Používáme měřicí napětí s frekvencí $50 \pm 2,5$ Hz. Doporučená ustálená teplota měřeného transformátoru je $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ve všech jeho částech, která klesla při chladnutí z provozní teploty. Výsledky měření ztrátového činitele a kapacit je silně ovlivňováno vlivem parazitních vazeb s okolím. Zejména pak při měření transformátorů v provozu v blízkosti dalších vysokonapětových zařízení. Proto je doporučeno provést dvě měření s vzájemně opačnou polaritou měřicího napětí a jako výsledek uvést aritmetický průměr z obou naměřených hodnot.

Zapojení měřicího obvodu dvouvinutového transformátoru provedeme dle obrázku 7.4. Měření provádíme na uzemněném objektu a nízkonapětové vinutí připojené k měřicímu přívodu tvoří virtuální zem, pomocí které odstraníme vzájemnou kapacitní vazbu mezi vysokonapětovým a nízkonapětovým vinutím.



Obr. 7.4 Zapojení obvodu pro měření ztrátového činitele a kapacity transformátoru. VN – vinutí vyššího napětí, NN – vinutí nižšího napětí, K – kostra transformátoru, VNK – vysokonapětový přívod můstku, MK – měřicí přívod můstku, G – kostra můstku, C_{HG} – kapacita mezi vinutím vyššího napětí a kostrou transformátoru, C_{LG} – kapacita mezi vinutím nižšího napětí a kostrou transformátoru, C_{HL} – kapacita mezi vinutím vyššího a nižšího napětí, C_X – naměřená kapacita, převzato z [2]

7.2.2 Postup měření

Nejprve měříme ztrátový činitel a kapacitu mezi oběma vinutími (C_{HL}) s kabelem VNK připojeným k vinutí vyššího napětí a měřicí kabel MK k vinutí nižšího napětí. Kostra zdroje měřicího napětí se spojí s kostrou transformátoru. Po přehození polarit zkušební

napětí měření opakujeme. Hodnotu ztrátového činitele a kapacity vypočteme dle vztahů 7.1 a 7.2 uvedených níže. Indexy 1 znamenají kladnou polaritu zkušebního napětí a indexy 2 polaritu zápornou.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1 \cdot C_1 + \operatorname{tg} \delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (7.1)$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (7.2)$$

Pokud není možné zajistit teplotu 20°C měřeného objektu při zkoušce, je možné provést přepočítání ztrátového činitele z odlišné teploty dle vztahu 7.3 s použitím přepočítávacího koeficientu K v souladu s ANSI/IEEE C 57.12.90-1980:.

$$\operatorname{tg} \delta_{20} = \frac{\operatorname{tg} \delta_v}{K} \quad (7.3)$$

kde $\operatorname{tg} \delta_v$ je ztrátový činitel naměřený při aktuální teplotě.

7.2.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Vyhodnocení naměřených výsledků provádíme na základě porovnání aktuálních hodnot s hodnotami z předchozích pravidelných měření. Jako mezní hodnoty ztrátového činitele u nových transformátorů pro napětí 100 – 400 kV lze považovat $\operatorname{tg} \delta_{MAX} = 0,1$, u transformátorů po opravě $\operatorname{tg} \delta_{MAX} = 0,15$ a u transformátorů v provozu $\operatorname{tg} \delta_{MAX} = 0,03$. U nových strojů s pracovním napětím do 70 kV $\operatorname{tg} \delta_{MAX} = 0,2$, u transformátorů po opravě $\operatorname{tg} \delta_{MAX} = 0,03$ a u transformátorů v provozu $\operatorname{tg} \delta_{MAX} = 0,08$. Objeví-li se u naměřených kapacit mezi jednotlivými po sobě jdoucími měřeními rozdíl v rozsahu 10% - 30%, jedná se o pravděpodobnou vážnou závadu v izolačním systému. Výjimkou může být předchozí výměna izolačního oleje. Zbytková životnost elektroizolačního systému transformátoru provedeme na základě rozdělení pravděpodobnosti naměřených hodnot [1, 2, 18].

Závěr

Nároky na kvalitu elektroizolačních materiálů jsou neustále zvyšovány. Jedná se zejména o jejich materiálovou stálost a provozní spolehlivost. Na bezporuchovém chodu elektrických zařízení a jejich izolačního systému závisí v mnoha případech spolehlivost přenosu elektrické energie do odběrných míst. Je proto nutné v průběhu provozu takového zařízení sledovat pomocí diagnostického systému jeho provozní parametry a mít přehled o zbytkové životnosti celého systému.

V práci je popsáno několik faktorů způsobujících degradaci elektroizolačního materiálů. Mezi nejvýznamnější patří vliv teplotního namáhání a přítomnost částečných výbojů. S pomocí navržených postupů můžeme sledovat kondici izolačního systému v průběhu jeho provozu, případně je možné ověřit jeho kvalitu před samotným uvedením zařízení do provozu. K dosažení přesnějších výsledků stanovení životnosti je potřebná databáze naměřených hodnot z předchozích měření a možnost jejich porovnání za pomoci matematických modelů s jinými diagnostikovanými objekty stejného typu.

Seznam použité literatury

- [1] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [4] TRNKA, P. *Zbytková životnost elektroizolačních systémů*. Elektrověst. 4. 9. 2009, No. 22, s. 1-7. ISSN 1213-1539
- [5] Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., ISSN 1210-0889
- [6] Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Excitace [online]. [cit. 2012-02-19]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Excitace>
- [7] Jiráček, J., Autrata, R., Liedermann, K., a spol. Materiály a technická dokumentace: Přednáškové texty: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.
- [8] ČSN EN 60505 Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů, 8/2005
- [9] ElectroScope: Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů. 2007, roč. 2007, č. 1. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <http://147.228.94.20:12100/casopis/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c2.pdf>
- [10] ElectroScope: Životnost izolačního systému VPI při pulzním namáhání 2007, roč. 2007, č. 0. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2007/cislo0/r0c8.pdf>
- [11] ELEKTRO: elektrotechnická příručka: Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech. Praha: FCC Public, 2010, roč. 2010, č. 1. ISSN 1212-9933. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40272
- [12] ElectroScope: Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír 2007, roč. 2007, č. 1. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c13.pdf>
- [13] ORGREZ, a.s., Hudcova 76, 657 97 Brno. Metodika detekce částečných výbojů prostřednictvím zjišťování ozónu v chladicím médiu vn elektrických strojů točivých: Zpracoval: Ing. Jiří Brázdil, MBA, Ph.D. Brno, 2010.

- [14] MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Magdaléna TRNKOVÁ a Lumír ŠAŠEK.
Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie. 1. vydání. Praha: BEN, 2011. ISBN 978-80-7300-412-5.
- [15] TŮMA, Jiří. *Spolehlivost v elektroenergetice*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2006?, 291 s. ISBN 80-239-6483-6.
- [16] LEITL, R. Spolehlivost elektrotechnických systémů. Praha, 1990, 288 s. ISBN 80-030-0408-X
- [17] TOMKO, Marián. Měření částečných výbojů v přístrojových transformátorech napětí. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Petr Martínek, Ph.D.
- [18] Elektrevue - časopis pro elektrotechniku: Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů - 2. část. Brno: Ústav telekomunikací FEKT, 2011. ISSN 1213-1539