

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF ELECTRICAL TECHNOLOGY

# ANALÝZA VÍCEFAKTOROVÉHO NAMÁHÁNÍ NA DIELEKTRICKÁ SPEKTRA MATERIÁLŮ

ANALYSIS OF MULTISTRESS AGEING ON DIELECTRIC SPECTRAS OF MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR Bc. MIROSLAV KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

SUPERVISOR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektrotechnická výroba a management

Student:Bc. Miroslav KučeraRočník:2

*ID:* 98444 *Akademický rok:* 2010/2011

#### NÁZEV TÉMATU:

#### Analýza vícefaktorového namáhání na dielektrická spektra materiálů

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte elektrické metody, používané v diagnostice k hodnocení aktuálního stavu tuhých elektroizolačních materiálů v průběhu jejich životnosti. Podrobně popište účinky elektrického, tepelného a kombinovaného namáhání na vlastnosti materiálů, zpracujte přehled matematických modelů pro vícefaktorové stárnutí a jejich fyzikální interpretaci.

Navrhněte a realizujte pracoviště, určené k dlouhodobému tepelnému, elektrickému a kombinovanému namáhání zkušebních vzorků. Laboratorní pracoviště se pokuste automatizovat. Na vzorcích vybrané drážkové izolace realizujte zrychlené degradační zkoušky teplotou a elektrickým polem. Experimentálně získané výsledky frekvenčních závislostí složek komplexní permitivity matematicky aproximujte a fyzikálně interpretujte s ohledem na druh a délku namáhání.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynu vedoucího diplomové práce.

Termín zadání:7.2.2011Termín odevzdání: 26.5.2011Vedoucí práce:Ing. Zdenka Rozsívalová

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc. Předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku c.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT:

Diplomová práce pojednává o vlivu tepelného, elektrického a kombinovaného (tepelně elektrického) namáhání na elektrické vlastnosti elektroizolačního materiálu ISONOM NMN, který je používán jako drážková izolace v elektromotorech. Ke sledování namáhání je použita metoda dielektrické relaxační spektroskopie. Zkoumána jsou výsledná dielektrická spektra, která představují kmitočtové závislosti složek komplexní permitivity. Srovnáván je vliv jednotlivých namáhání na dielektrická spektra zkoumaného izolačního materiálu.

### **ABSTRACT:**

Diploma thesis treat of effect of thermal, electrical and combined (thermal electrical) stress on electrical characteristics of insulation material ISONOM NMN which is used as a slot insulation in electric motors. To monitor the stress is used the method of dielectric relaxation spectroscopy. Under examinations are the resultant dielectric spectra which constitute the frequency dependencies of components of complex permitivity. Compared are the effects of particular stresses on dielectric spectra of surveyed insulative material.

## Klíčová slova:

komplexní permitivita, elektrické namáhání, kombinované namáhání, stárnutí, vlhkost, dielektrická relaxační spektroskopie, doba života

### Keywords:

complex permittivity, electrical stress, multistress ageing, ageing, moisture, dielectric relaxation spectroscopy, life time

## Bibliografická citace díla

KUČERA, M. *Analýza vícefaktorového namáhání na dielektrická spektra materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsívalová.

## PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že tuto vysokoškolskou kvalifikační práci na téma ANALÝZA VÍCEFAKTOROVÉHO NAMÁHÁNÍ NA DIELEKTRICKÁ SPEKTRA MATERIÁLŮ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb."

V Brně dne: 24. 5. 2011

.....

## PODĚKOVÁNÍ:

Na úvod bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Zdence Rozsívalové za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů mé práce.

Dále děkuji Ing. Martinu Frkovi Ph.D. za významnou pomoc v průběhu praktické realizace experimentu a všem pracovníkům Ústavu elektrotechnologie.

## OBSAH

ÚVOD9				
1 TEOR	ETICKÁ ČÁST	.10		
1.1 FY	ZIKÁLNÍ DĚJE V DIELEKTRIKU	10		
1.1.1	Dielektrická polarizace	11		
1.1.2	Polarizační mechanismy	12		
1.1.3	Elektrická vodivost tuhých izolantů	15		
1.1.4	Průraz izolantů	17		
1.1.5	Dielektrické ztráty	17		
1.2 Ko	MPLEXNÍ PERMITIVITA	19		
1.3 ST	ÁRNUTÍ DIELEKTRICKÝCH MATERIÁLŮ	24		
1.3.1	Tepelné stárnutí	25		
1.3.2	Elektrické stárnutí	26		
1.3.3	Kombinované stárnutí	28		
1.3.4	Zrychlené stárnutí	30		
1.4 MA	TEMATICKÉ MODELY K POPISU KOMBINOVANÉHO STÁRNUTÍ	31		
1.4.1	Crineúv model	32		
1.4.2	Simoniho model	34		
1.4.3	Ramuúv model	34		
1.4.4	Fallouúv model	35		
1.4.5	Montanariho model	36		
1.5 Ži∨	OTNOST IZOLACÍ	36		
1.6 NA	VLHAVOST A NASÁKAVOST LÁTEK	.40		
1.6.1	Vliv vlhkosti na degradaci kompozitních izolantů	40		
1.6.2	Navlhavost	41		
1.7 SL	DŽENÉ MATERIÁLY - KOMPOZITY	.42		
1.7.1	Dělení složených materiálů	42		
1.7.2	Vliv stárnutí na kompozitní materiály	43		
1.8 ELI	EKTRICKÉ DIAGNOSTICKÉ METODY ZJIŠŤOVÁNÍ STAVU IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ.	.43		
1.8.1	Metoda měření absorpčních a resorpčních charakteristik	44		
1.8.2	Metoda Scheringova můstku	44		
1.8.3	Metoda čtyřkapacitního můstku	45		
1.8.4	Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát	46		
1.8.5	Rezonančni metoda meřením nakmitaného napěti (Q-metr)	47		
1.9 DIE	LEKTRICKA RELAXACNI SPEKTROSKOPIE (DRS)	47		
1.9.1	Princip dielektricke relaxačni spektroskopie	48		
1.9.2	Druhy relaxacnich mechanismu	48		
1.9.3	Distribuce relaxacnich kmitočtů metodou DRS	50		
1.9.4	Casova oblast DRS	50		
1.9.5		53		
1.10 I	RENDY V NAMAHANI ELEK I ROIZOLACNICH MATERIALU	.53		
2 EXPE	RIMENTÁLNÍ A MĚŘÍCÍ ČÁST	57		
2.1 Dr	ÁŽKOVÁ IZOLACE ISONOM NMN	.57		
2.1.1	NOMEX	58		
2.1.2	Polyethyléntereftalát	59		

2.2 PRACOVIŠTĚ PRO NAM	ÁHÁNÍ A PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ	60
2.2.1 RLC - metr Agile	nt E4980A	60
2.2.2 Dvouelektrodový	systém	63
2.2.3 Tříelektrodový sy	rstém	64
2.2.4 Zdroj Diametral		65
2.2.5 Vysokonapěťový	zdroj	65
2.2.6 Klimatické komor	y SteriCell 55 a 111	66
2.2.7 Modifikované pra	coviště pro měření v teplotních cyklech	66
2.2.8 Použité PC progr	amy	67
2.3 POSTUP MĚŘENÍ	-	67
2.4 Výsledky měření		69
2.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDK	Ů MĚŘENÍ	83
3 ZÁVĚR		88
4 POUŽITÁ LITERATURA		89
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKF	ATEK	92

## Úvod

V současné době se pokrok ve všech směrech průmyslových odvětví hodně zrychluje. Stejně je na tom i oblast elektrotechniky. S rychlým vývojem nových součástek, motorů, zařízení atd. je také potřeba stále zlepšovat jejich vlastnosti. Samozřejmě, že zlepšením jejich elektrických, mechanických, fyzických nebo i třeba chemických vlastností lze dosáhnout mnoha způsoby, ale jedním z nejzákladnějších je volba materiálu. Ale nejen materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, ale i třeba materiálu jejich různých součástí, například izolací atd.

U elektrických zařízení je izolační materiál nejslabším článkem celého spolehlivostního řetězce. Je tedy samozřejmostí, že vývinu kvalitního izolačního materiálu se věnuje mnoho času. V dnešní době je nejčastěji používaná kompozitní (složená) izolace. Složená izolace znamená, že je složena z několika vrstev různých materiálů, které podstatně mění její výsledné vlastnosti.

Každá izolace, která je používána v elektrotechnických aplikacích je vystavena vlivům prostředí, ve kterém se nachází. Proto je nutné vyzkoušet a otestovat patřičnými metodami její odolnost vůči těmto vlivům. Pokud jde o elektrotechnická zařízení, tedy motory, měniče kmitočtu atd. většinou se jedná o působení vysoké teploty a elektrického pole, popřípadě i jiných vlivů.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem vícefaktorového namáhání na konkrétní druh izolačního materiálu ISONOM NMN. Ten je používán hlavně jako drážková izolace v různých vysokonapěťových točivých strojích. V provozu je vystaven působení vysoké teploty a intenzitě elektrického pole. Na působení těchto dvou faktorů, zvlášť nebo dohromady, je zaměřen tento experiment.

Vzorky materiálu jsou vystaveny namáhání simulující horší, než provozní podmínky podle normy určující parametry zrychleného stárnutí. Zkoumán je vliv těchto faktorů na dielektrická spektra. Ke studiu spekter bylo využito metody dielektrické relaxační spektroskopie. Byly proměřovány základní parametry, tedy ztrátový úhel a paralelní kapacita, ze kterých byly vypočítány složky komplexní permitivity. Relativní permitivita a ztrátové číslo pak byly vyneseny v kmitočtových závislostech.

V současné době probíhá mnoho výzkumů a experimentů zaměřených na podobná témata.

## 1 Teoretická část

#### 1.1 Fyzikální děje v dielektriku

Úvodem je nutné vysvětlit rozdíl mezi pojmy dielektrikum a izolant. Dielektrikum je chápáno v souvislosti se schopností elektrickou energii akumulovat, zatímco izolant ve vztahu izolovat vodivé části s různým potenciálem. Ideální dielektrikum (izolant) obsahuje pouze vázané elektrické náboje, zatímco reálné dielektrikum (izolant) obsahuje, jak vázané, tak i volné elektrické náboje. Přiložením elektrického pole dochází k určitým základním fyzikálním dějům uvnitř dielektrika, k nimž patří:

- dielektrická polarizace
- elektrická vodivost
- dielektrické ztráty
- elektrický výboj.

Základní elektrické veličiny pro tyto fyzikální jevy jsou:

-	relativní permitivita	$\mathcal{E}'$	(-)
-	vnitřní rezistivita	$ ho_{ m v}$	(Ω m)
-	povrchová rezistivita	$ ho_{ m p}$	(Ω)
-	ztrátový činitel	tg $\delta$	(-)
-	elektrická pevnost	$E_{\rm p}$	(V m <sup>-1</sup> ).

Vlastnosti dielektrik závisí na chemickém stavu, složení, skupenství a struktuře. Jsou složena z atomů, molekul a iontů. Molekuly jsou v tomto případě klasifikovány podle způsobu uspořádání vázaných nábojů, a to na molekuly nepolární (neutrální) a polární (dipólové).

**Molekuly nepolární** se vyznačují zcela symetrickou stavbou. Tato stavba je porušena přiložením elektrického pole. Tím se vytvoří elektrický dipól.

Molekuly polární se vyznačují nesymetrickou stavbou, ale také stálým elektrickým momentem, a to i v nepřítomnosti elektrického pole. V přítomnosti elektrického pole se

dipólové molekuly natáčejí do směru tohoto pole. Jednotkou pro elektrický (dipólový) moment je jeden debye (D). [22]

#### 1.1.1 Dielektrická polarizace

Je to fyzikální jev, při němž se působením, jak vnitřního, tak i vnějšího, elektrického pole přesouvají elektricky vázané náboje ze svých rovnovážných poloh do nových, ale jen na malé vzdálenosti. Jestliže látka obsahuje dipólové molekuly, tyto se orientují do směru přiloženého elektrického pole. Výjimečně mohou být příčinou dielektrické polarizace i volné nosiče náboje. V každém dielektriku musí být zachována podmínka elektroneutrality, tzn., že náboj kladně nabitých částic musí být kompenzován nábojem částic záporně nabitých. Je li krystalická mřížka dielektrika složena s kladně a záporně nabitých iontů, pak se ionty po přiložení elektrického pole posunou. Pružným posunem každého páru nábojů vznikne elementární elektrický dipól. Tento děj se nazývá polarizací. Při posunu získá každá z částic indukovaný dipólový moment  $\vec{\mu}_i$ . Je to vektor orientovaný ve směru elektrického pole, které vyvolává polarizaci. Dielektrikum v elektrickém poli je souborem elektrických dipólů, jejichž momenty se orientují ve směru přiloženého pole působícího na dielektrikum. Součet všech indukovaných elementárních dipólových momentů v jednotkovém objemu je vektor polarizace  $\vec{P}$ , který lze vypočítat jako

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{\mu}_i}{v}.$$
(1)

Vektor polarizace  $\vec{P}$  a relativní permitivita  $\varepsilon'$  jsou mírou polarizace. Další důležitou veličinou je polarizovatelnost  $\alpha$ . Polarizovatelnost vyjadřuje schopnost polarizace vlastního dielektrika

$$\vec{P} = n \,\alpha \, \vec{E_1} \tag{2}$$

kde n je koncentrace polarizovatelných částic a  $E_1$  je intenzita vnitřního (lokálního) elektrického pole. Tato rovnice platí pro mikroskopické hledisko.

Další charakteristickou veličinou pro popis chování dielektrika v elektrickém poli je elektrická indukce  $\vec{D}$ . Pro elektrickou indukci platí vztah

$$\vec{D} = \varepsilon' \ \vec{D_0},\tag{3}$$

kde  $\overrightarrow{D_0}$  je elektrická indukce ve vakuu, která se vypočítá

$$\overrightarrow{D_0} = \varepsilon_0 \, \overrightarrow{E},\tag{4}$$

kde  $\vec{E}$  je intenzita vnějšího (makroskopického) elektrického pole. Pro vzájemný vztah mezi vektorem polarizace a elektrickou indukcí platí

$$\vec{P} = \vec{D} - \vec{D_0},\tag{5}$$

po dosazení a následné úpravě vyjde vztah pro vektor polarizace

$$\vec{P} = (\varepsilon' - 1)\varepsilon_0 \,\vec{E}.\tag{6}$$

Kde  $(\varepsilon' - 1) = \chi$  a  $\chi$  je dielektrická susceptibilita.

Jak je patrné z rovnic (2) a (6), existují dva vztahy pro výpočet vektoru polarizace, a to na základě působení, buď vnějšího (makroskopického), nebo vnitřního (lokálního nebo mikroskopického) elektrického pole. Sjednocením těchto dvou hledisek (makroskopického a mikroskopického) je Clausiova rovnice, tedy

$$P = (\varepsilon' - 1)\varepsilon_0 E = n \alpha E_{\rm l},\tag{7}$$

po dosazení a následných úpravách vyjde Clausiova - Mossotiho rovnice

$$\frac{\varepsilon'-1}{\varepsilon'+2} = \frac{n\,\alpha}{3\,\varepsilon_0} = P_{\rm m},\tag{8}$$

kde P<sub>m</sub> je polarizací poměrnou. [11], [22]

#### 1.1.2 Polarizační mechanismy

Při působení elektrického pole se často v dielektrické látce nevyskytuje pouze jeden, ale několik druhů polarizačních mechanismů najednou. Slabší mechanismy bývají překryty silnějšími. Každý polarizační mechanismus se vyznačuje určitými typickými rysy. Zpravidla se klasifikují, na základě rychlosti odezvy polarizovaných částic na přiložené elektrické pole, na jevy s rychlým průběhem (pružné polarizace) a jevy s pomalým průběhem (relaxační polarizace).

 Polarizace rychlé se vyznačují extrémně krátkou dobou trvání, jsou nezávislé na kmitočtu a teplotě. Probíhají beze ztrát. Základ tvoří nosiče elektrického náboje – elektrony nebo ionty, které jsou silně vázány v atomu či molekule. Dochází k vychýlení velkého počtu částic z jejich rovnovážných poloh na velmi malé vzdálenosti.

- a) Polarizace elektronová se vyskytuje u všech dielektrik, je bezeztrátová a nezávisí na teplotě. Má krátkou dobu ustálení (10<sup>-15</sup>- 10<sup>-14</sup> s), z toho vyplývá, že je kmitočtově nezávislá. Vlivem působení elektrického pole se kladné jádro atomu posune ve směru jeho působení, kdežto elektronový obal ve směru opačném. Výsledná vzdálenost je dána rovnováhou sil elektrického pole a sil, jimiž jsou elektrony vázány k jádru. Do kmitočtů 10<sup>15</sup> Hz je konstantním příspěvkem permitivity.
- b) Polarizace iontová-pružná probíhá jen u iontových krystalů, je bezeztrátová a má malou teplotní závislost. Má krátkou dobu ustálení (10<sup>-13</sup>- 10<sup>-12</sup> s), z toho vyplývá, že je také kmitočtově nezávislá. Její doba ustálení je větší než u polarizace elektronové, protože elektrony jsou lehčí než ionty. Vlivem působení elektrického pole se pružně posunou kladné ionty ve směru jeho působení a záporné ionty v opačném směru. Pružné vychýlení iontů způsobí změnu velikosti nebo směru dipólových momentů. Do kmitočtů 10<sup>13</sup> Hz je konstantním příspěvkem permitivity. [11]
- 2. Polarizace pomalé polarizace přibývá nebo ubývá postupně (časový průběh je charakterizován časovou konstantou τ, tzv. relaxační dobou), závisí na teplotě a vždy je provázena ztrátami. Přiložením elektrického pole se částečně usměrní chaotické tepelné pohyby částic a změní se výška energetické potenciálové bariéry. Polohy ve směru elektrického pole jsou energeticky výhodnější a tím dochází k nerovnoměrnému rozložení částic a ke vzniku dipólového momentu.
  - a) Polarizace dipólová je charakteristická pro polární látky, je provázena ztrátami energie v dielektriku a je silně závislá na teplotě a na kmitočtu. Má delší dobu ustavení (10<sup>-12</sup>- 10<sup>-8</sup> s). Připojením elektrického pole se změní orientace dipólů ve směru působení pole, protože v tomto směru jsou pozice energeticky výhodnější. V ustáleném stavu vznikne nerovnoměrné rozložení orientovaných dipólů a tím dochází ke vzniku dipólového momentu.

b) Polarizace iontová-relaxační vzniká v iontových látkách s netěsným uložením iontů (anorganická skla, keramika), je provázena ztrátami energie a je silně závislá na teplotě a kmitočtu. Má delší dobu ustavení (10<sup>-12</sup>- 10<sup>-8</sup> s). Přiložením elektrického pole se částečně usměrní chaotické tepelné pohyby částic a změní se tak výška potenciálové bariéry. V ustáleném stavu vzniká nerovnoměrné rozložení částic a dochází ke vzniku dipólového momentu. [11]

#### 3. Polarizace zvláštní

- a) Polarizace mezivrstvová (migrační) se vyskytuje u látek s makroskopickými nehomogenitami (to jsou látky, jako laminát, pórovité, pěnové a různě znečistěné látky). Jednotlivé složky mají různou permitivitu a elektrickou vodivost. Jedná se o nejpomalejší polarizační mechanismus projevující se pouze v oblasti velmi nízkých kmitočtů, je provázen ztrátami energie v látce a je silně závislý na teplotě. Podmínkou je migrace volných nosičů elektrického náboje, které se kumulují na rozhraní vrstev a dochází tak ke vzniku prostorového náboje. Následkem nestejného rozložení prostorových nábojů vznikne dipólový moment.
- b) Polarizace samovolná (spontánní) existuje jen ve feroelektrických látkách s tzv. doménovou strukturou (jsou to makroskopické oblasti, v nichž jsou všechny částice plně, spontánně, polarizovány v důsledku působení vnitřních výměnných sil), je ztrátová, závislá na kmitočtu a intenzitě elektrického pole a značně závislá na teplotě. Po připojení elektrického pole se (elektrické) momenty jednotlivých domén skokem přeuspořádají do směru působení pole a tím vzniká dipólový moment a silná polarizace.
- c) Polarizace trvalá (permanentní) je podmíněna malou elektrickou vodivostí polárních látek. Permanentně zpolarizovaným tělesům se říká elektrety. Následkem orientace dipólových molekul a vytvoření prostorových nábojů vzniká přídavný dipólový moment, který si látka podrží.
- d) Polarizace rezonanční probíhá ve všech dielektrikách, projevuje se v optickém spektru kmitočtů a nulovými ztrátami energie. Vzniká následkem rezonance vlastních kmitů částic s elektrickým nábojem s kmity vnějšího elektrického pole.

Kromě uvedených polarizačních mechanismů existují ještě zvláštní polarizační jevy, které v elektrotechnice hrají významnou roli. Jedná se zejména o elektrostrikci, pyroelektrický a piezoelektrický jev. [11]

#### 1.1.3 Elektrická vodivost tuhých izolantů

Elektrická vodivost [11] je pohyb volných nebo slabě vázaných nábojů v elektrickém poli. Je závislá na druhu nosičů náboje (velikosti náboje, driftové pohyblivosti) a na jejich koncentraci. Elektrickou vodivost podle druhu nosičů náboje tedy dělíme na iontovou (ionty příměsí, nečistot, ionty vlastní látky), elektronovou (v elektrických polích o velmi vysoké intenzitě) a elektroforetickou (nosiči jsou koloidní částice v kapalných látkách). Dále můžeme elektrickou vodivost dielektrických látek rozdělit podle povahy na vnitřní a povrchovou, přičemž povrchovou vodivost lze pozorovat pouze u tuhých látek.

Základní veličiny a vztahy elektrické vodivosti jsou

- vnitřní konduktivita  $\gamma_v$ 

$$\gamma_{\rm v} = n \, q \, u \tag{9}$$

- povrchová konduktivita  $\gamma_p$ 

$$\gamma_{\rm p} = \frac{J_{\rm p}}{E} \tag{10}$$

- vnitřní rezistivita  $\rho_v$ 

$$\rho_{\rm v} = \frac{1}{\gamma_{\rm v}} \tag{11}$$

- povrchová rezistivita  $\rho_{\rm p}$ 

$$\rho_{\rm p} = \frac{1}{\gamma_{\rm p}},\tag{12}$$

kde *n* je koncentrace nosičů elektrického náboje, *q* je náboj nosiče elektrického náboje,  $\mu$  je driftová pohyblivost a *E* je intenzita elektrického pole. [11]

#### 1. Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů

 závisí na chemickém složení a struktuře látek, defektech vnitřního uspořádání a na druhu a obsahu nečistot a příměsí

- přemisťování volných nosičů náboje vlivem elektrického pole je obdobné jako u difuze
- značná závislost vnitřní konduktivity na teplotě je podmíněna především výraznou teplotní změnou koncentrace nosičů
- pro jeden druh mechanismu vnitřní konduktivity platí

$$\gamma_{\rm v} = A \ e^{-\frac{b}{T}} \tag{13}$$

- tento vztah se často používá i v logaritmickém tvaru:

$$\ln \gamma_{\rm v} = \ln A - \frac{b}{T} \tag{14}$$

v silných elektrických polích lze popsat změny vnitřní konduktivity empirickým vztahem podle Pooleho (vhodnější pro nekrystalické látky)

$$\gamma_{\rm v} = \gamma_{\rm v} \, e^{\beta \, E} \tag{15}$$

- nebo empirickým vztahem podle Frenkela (vhodnější pro krystalické látky)

$$\gamma_{\rm v} = \gamma_{\rm v(0)} \, e^{\beta_1 \sqrt{E}},\tag{16}$$

kde  $\gamma_v$  je vnitřní konduktivita, *E* je intenzita elektrického pole, *T* je absolutní teplota a *A*, *b* jsou materiálové konstanty. [11]

#### 2. Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů

- Je podmíněna především vlhkostí adsorbovanou na jejich povrchu. K podstatné elektrické vodivosti vody stačí i velmi tenký vodní film. Velikost povrchové vodivosti určuje hlavně tloušťka tohoto filmu, ta ale závisí na vlastnostech tuhé látky. Z toho důvodu je povrchová vodivost posuzována jako specifická vlastnost materiálu.
- Rozhodující vliv na velikost povrchové vodivosti mají tyto faktory:
  - relativní vlhkost prostředí
  - schopnost látky odpuzovat nebo vázat vodu
  - teplota
  - čistota a hladkost povrchu materiálu. [11]

#### 1.1.4 Průraz izolantů

Průraz izolantu je fyzikální děj, při kterém dochází k výboji. Výboj vzniká, pokud dojde k překročení kritického gradientu elektrického pole. Je to náhlý jev, při kterém dojde k vytvoření dokonale vodivé cesty uvnitř izolantu. Elektrické výboje se dělí na:

- samostatné a nesamostatné
- vysokotlaké a nízkotlaké
- ustálené a neustálené
- úplné a částečné.

Průraz v tuhých izolantech způsobí trvalé zhoršení elektroizolačních vlastností, u plynných nebo kapalných izolantů je toto zhoršení jen dočasné. U tuhých izolantů rozlišujeme několik druhů činitelů, které ovlivňují míru elektrické pevnosti. Jsou to: teplota, tloušťka izolantu, charakter a druh elektrického pole, jeho kmitočet, doba působení elektrického pole a vliv částečných výbojů v plynových dutinkách.

U tuhých izolantů lze rozeznat dva typy průrazů:

- 1. čistě elektrický průraz
- 2. tepelný průraz.

Čistě elektrický průraz – jedná se o velmi rychlý průběh průrazu, většinou trvá  $10^{-7}$  až  $10^{-8}$  sekund. Místo průrazu je tvaru čistého otvoru bez jakýchkoliv stop opáleného okolí.

**Tepelný průraz** – průběh průrazu je pomalý. Trvá několik sekund, někdy i minut. Po průrazu zůstane místo ve tvaru vypáleného otvoru se zuhelnatělým okolím. [22]

#### 1.1.5 Dielektrické ztráty

Ideální izolant má nulovou elektrickou vodivost, ale protože ideální izolant neexistuje, je zřejmé, že ten reálný, tedy technický izolant, bude mít určitou, zpravidla velice malou elektrickou vodivost. Dále obsahuje nečistoty, příměsi a má určitou vlhkost, což znamená, že přiložené elektrické pole způsobí vznik nestacionárních přesunů uvnitř dielektrika. Tyto pochody vedou ke ztrátám energie v dielektriku. Ztráty v dielektriku představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce při vložení materiálu do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení, jak stejnosměrného, tak i střídavého elektrického pole,

jsou provázeny zahříváním dielektrika a jsou také příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem.

V dielektriku působí několik druhů ztrát, které jsou rozdílné svým fyzikálním základem. Tyto ztráty se navzájem sčítají. Z pohledu fyzikální podstaty se v dielektriku rozlišují **vodivostní ztráty** (u všech dielektrik, podmíněny vnitřní a povrchovou vodivostí), **ztráty polarizační** (kmitočtové a tepelné charakteristiky ztrát vycházejí z druhu polarizace v dielektriku) a **ionizační ztráty** (vyskytují se u plynů a u tuhých a kapalných dielektrik, které plyny obsahují).

Veličiny, které vyjadřují velikost dielektrických ztrát, jsou:

- ztrátový úhel  $(\delta)$
- ztrátový činitel  $(tg \delta)$
- ztrátové číslo  $(\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta)$
- měrné dielektrické ztráty (ztrátový výkon  $P_z$  vztažený na jednotku objemu látky).

Nejdůležitější veličinou z výše uvedených je **ztrátový činitel**. Hlavní faktory, ovlivňující ztrátový činitel, jsou teplota a kmitočet přiloženého elektrického pole (u všech dielektrik). U feroelektrik je to ještě intenzita elektrického pole.

Ztrátové dielektrikum můžeme z důvodů výpočtu ztrátového výkonu  $P_z$  a ztrátového činitele tg  $\delta$  nahradit ekvivalentním náhradním zapojením. Pro tato náhradní zapojení se pak kreslí fázové diagramy napětí a proudů, v nichž je ztrátový úhel  $\delta$  mírou nedokonalosti dielektrika. [22]



Obr. 1: Teplotní a kmitočtová závislost ztrátového činitele polárního dielektrika [22]

#### 1.2 Komplexní permitivita

Další důležitou veličinou je komplexní permitivita [22]. Komplexní permitivita popisuje chování technického dielektrika ve střídavém elektrickém poli. Definuje se pomocí tří základních vztahů

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \,\varepsilon'',\tag{17}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \tag{18}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' \,(1 - j \operatorname{tg} \delta), \tag{19}$$

kde  $\varepsilon'$  je reálná část komplexní permitivity (relativní permitivita),  $\varepsilon''$  je imaginární část komplexní permitivity (ztrátové číslo). Reálná složka je mírou kapacitního charakteru dielektrika. A imaginární složka je mírou ztrát vzniklých v dielektriku namáháním střídavým elektrickým polem.

Kmitočtovou závislost komplexní permitivity dielektrického materiálu lze podle Debyeho teorie vyjádřit vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{\rm s} - \varepsilon_{\infty}}{1 + j \,\omega \,\tau},\tag{20}$$

kde  $\varepsilon_{\infty}$  je optická permitivita  $(f \to \infty)$ ,  $\varepsilon_s$  je statická permitivita  $(f \to 0)$ ,  $\tau$  je relaxační doba a  $\omega$  je kruhový kmitočet. Tento vztah však platí jen pro jeden polarizační mechanismus s jednou, přesně stanovenou, relaxační dobou  $\tau$ . Debyeho rovnice je matematicky a fyzikálně odvozena za předpokladu, že platí:

- nosiče dipólových momentů se vzájemně neovlivňují
- všechny dipóly mají tvar koule a mají stejnou hodnotu relaxační doby
- orientace dipólů je bez přiloženého elektrického pole ve všech směrech stejně pravděpodobná
- kmitočet elektrického pole musí být menší než kmitočet tepelných kmitů nosičů náboje, nedochází k relaxační polarizaci
- velikost vnitřního elektrického pole musí být stejná jako velikost vnějšího elektrického pole.

Z těchto podmínek vyplývá, že Debyeho rovnice dobře popisuje polarizační děje pro slabě polární dielektrika.

Po vynásobení vztahu (20) komplexně sdruženým číslem a následnou úpravu se získají vztahy pro reálnou a imaginární část respektive pro relativní permitivitu a ztrátové číslo

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2}, \qquad (21)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}.$$
(22)

Grafy odpovídající závislostem relativní permitivity a ztrátového čísla na kmitočtu jsou znázorněny na obr. 2. Je vidět, že relativní permitivita se vzrůstajícím kmitočtem klesá. Zatímco závislost  $\varepsilon' = f(\omega)$  prochází inflexním bodem při mezním kmitočtu  $\omega_m$ , závislost  $\varepsilon'' = f(\omega)$  vykazuje při  $\omega_m$  maximum. Dielektrické ztráty klesají při kmitočtech limitujících k nule a k nekonečnu. Kmitočtová disperze permitivity je oblast, kde relativní permitivita klesá s kmitočtem, v této oblasti se nachází maximum ztrátového čísla  $\varepsilon''_m$ . Závislosti  $\varepsilon' = f(\omega)$  a  $\varepsilon'' = f(\omega)$ , zobrazené čárkovanými čarami, odpovídají křivkám při distribuci relaxačních dob.



**Obr. 2**: Kmitočtová závislost relativní permitivity a ztrátového čísla na kruhovém kmitočtu, tento obrázek je grafické zobrazení rovnic (21) a (22). [22]

Z rovnic (21) a (22) je možné odvodit vztah pro ztrátový činitel tg $\delta$  jako podíl imaginární a reálné složky

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\omega\tau(\varepsilon_{s} - \varepsilon_{\infty})}{\varepsilon_{s} + \varepsilon_{\infty}\omega^{2}\tau^{2}}.$$
(23)

Úpravou Debyeho rovnic, tedy vyloučením členu  $\omega \tau$  z rovnic pro reálnou a imaginární složku, dostaneme rovnici kružnice

$$\left[\varepsilon' - \left(\frac{\varepsilon_{\rm S} + \varepsilon_{\infty}}{2}\right)\right]^2 + {\varepsilon''}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{\rm S} - \varepsilon_{\infty}}{2}\right)^2 \tag{24}$$

Střed kružnice je dán souřadnicemi

$$S\left[\frac{\varepsilon_{\rm S}-\varepsilon_{\infty}}{2};0\right]$$
 (25)

a poloměr r se rovná

$$r = \frac{\varepsilon_{\rm S} - \varepsilon_{\infty}}{2}.$$
 (26)

Grafickým znázorněním rovnice (24) vznikne tzv. Coleho – Coleho diagram, který je znázorněný na obr. 3. Je to znázornění závislosti komplexní permitivity ve tvaru  $\varepsilon'' = f(\varepsilon')$  při konstantní teplotě. Vynesením hodnot  $\varepsilon''$  a  $\varepsilon'$  do komplexní roviny vyplňují hodnoty  $\varepsilon^*$  kruhový oblouk, který protíná reálnou osu  $\varepsilon'$  v bodech  $\varepsilon_s$  a  $\varepsilon_\infty$ .



Obr. 3: Coleho – Coleho kruhový diagram (Debyeho průběhu) [22]

Coleho – Coleho diagram platí jen pro omezený počet dielektrik. Chování většiny dielektrik lépe popisuje Cole – Coleho diagram se středem kružnice pod osou  $\varepsilon'$ . [11], [22]

#### 1. Cole – coleho diagram

Vztah pro tento diagram vznikl úpravou Debyeho rovnice parametrem  $\alpha$  a výsledný vztah tedy je

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}}, \qquad (27)$$

kde  $\alpha$  je kmitočtově nezávislý distribuční parametr určující šířku rozdělení (nabývá hodnot v intervalu {0;1}) a  $\tau_0$  je nejpravděpodobnější relaxační doba, okolo které jsou relaxační doby rozloženy podle distribuční funkce  $f(\tau)$ . Výpočet distribuční funkce  $f(\tau)$  je však v praxi velice složitý a možný pouze při zavedení zjednodušujících parametrů. V praxi se tedy používá aproximace komplexní permitivity pomocí patřičné analytické funkce. Grafickým vyjádřením rovnice (27) je obr. 4. Střed kružnice je posunut pod osu  $\varepsilon'$  a jeho poloha se vypočítá pomocí parametru  $\alpha$ . [22]



Obr. 4: Cole – coleho diagram při distribuci relaxačních dob [22]

#### 2. Cole – Davidsonova rovnice

Vznikla úpravou Debyeho vztahu koeficientem  $\beta$ . Tím přejde rovnice pro komplexní permitivitu na asymetrický tvar. Empirický vztah, respektující rozptyl relaxačních dob, je ve tvaru:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{\rm s} - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau_0)^{\beta}}$$
(28)

kde  $\beta$  je parametr charakterizující rozptyl relaxačních dob (nabývá hodnot v intervalu {0;1}). Grafickou závislostí Cole – Davidsonovy rovnice je deformovaná kružnice zploštělá směrem k vysokým kmitočtům. Klesající parametr  $\beta$  způsobuje větší zploštění a nesouměrnost. Grafem rovnice (28) je obr. 5. [11]



Obr. 5: Cole – Davidsonův diagram [31]

#### 3. Havriliak – Negamiho rovnice

Je to kombinace obou předchozích rovnic (27) a (28). Vztah pro komplexní permitivitu, respektující rozptyl relaxačních dob má tvar

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{\rm s} - \varepsilon_{\infty}}{[1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}]^{\beta}}$$
(29)

kde ( $\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ ) je intenzita relaxačního procesu,  $\alpha$  je distribuční parametr určující šířku relaxačního maxima a  $\beta$  je distribuční parametr vyjadřující míru asymetrie rozložení relaxačních dob. Havriliak – Negamiho rozdělení se nejčastěji používá pro matematický popis naměřených grafických závislostí, protože na rozdíl od ostatních rovnic disponuje nejvíce nezávislými parametry, které zvyšují možnost dosažení shody s experimentem. Další významnou vlastností je, že v logaritmicko-logaritmických souřadnicích je závislost  $\varepsilon' = F(\omega)$  tvořena dvěma přímkami se směrnicemi  $\alpha$  pro  $\omega \ll \frac{1}{\tau_0}$  pro nízkofrekvenční část a  $\beta$  pro  $\omega \gg \frac{1}{\tau_0}$  pro vysokofrekvenční část. Z toho vyplývá, že parametry  $\alpha$  a  $\beta$  mají názornou geometrickou interpretaci. Grafickým znázorněním Havriliak – Negamiho rovnice je obr. 6.



Obr. 6: Havriliak – Negamiho diagram v log/log souřadnicích [31]

Parametry  $\alpha$  a  $\beta$  mají kromě matematické interpretace i fyzikální interpretaci. Parametr  $\alpha$  vyjadřuje vzájemnou kooperativnost otáčejících se dipólů a  $\beta$  vyjadřuje míru prostorového omezení otáčejících se dipólů. [11]

#### 1.3 Stárnutí dielektrických materiálů

Izolace jako taková je vystavena různým vlivům, například klimatickým. Tyto vlivy, působící po určitou dobu, pak mají za následek fyzikální a chemické změny. Tomuto procesu se říká stárnutí. U dielektrických materiálů se projevuje jejich postupným znehodnocováním, tedy trvalým zhoršením funkčních vlastností. Stárnutí se výrazněji uplatňuje u látek organických. Anorganické látky až na výjimky nestárnou. Se stárnutím úzce souvisí doba života izolačního systému a tím i doba života elektrického zařízení. Vzrůstajícím stárnutím totiž klesá spolehlivost a bezpečnost zařízení.

Důležité je vysvětlit pojem doba života. Doba života je časový úsek, po který je daný materiál schopen udržet svoje vlastnosti, v tomto případě tedy dielektrické vlastnosti, na takové úrovni, aby mohl vykonávat svoji normální činnost. Zároveň však doba života závisí na vlastnostech dielektrických materiálů. Jakmile materiál zestárne, tyto vlastnosti se zhorší a materiál už nemůže být dále používán.

Stárnutí izolačních systémů napomáhají (urychlují ho), různí činitelé. Tím nejvýznamnějším je působení teploty.

Dalšími faktory ovlivňujícími použitelnost dielektrik, jsou

- vzdušný kyslík
- elektrické pole
- klimatické vlivy
- mechanické namáhání
- chemické vlivy
- ultrafialové záření.

Změny, které tyto faktory způsobují, můžeme rozdělit, podle doby jejich účinku, na změny vratné a trvalé. Z toho logicky vyplývá, že vratné změny jsou dočasné a odezní po ukončení působení vlivů, které je vyvolaly. Mezi vratné vlivy patří například navlhání. Kdežto trvalé změny jsou nevratné. Tyto změny bývají obvykle strukturálního charakteru, a to znamená, že vlastnosti materiálu se trvale mění, zpravidla zhorší.

Hlavním faktorem stárnutí bývá teplota. Ostatní vlivy už jen napomáhají celkové destrukci materiálu. Na izolanty, používané ve vysokonapěťových zařízeních, má také velký vliv působení elektrického pole. [13]

#### 1.3.1 Tepelné stárnutí

Odolnost elektrických zařízení závisí výrazně právě na teplotě. Je to většinou nejslabší článek sériového spolehlivostního řetězce celého zařízení. Během tepelného stárnutí totiž dochází k nevratným fyzikálně chemickým procesům. Bývají projevem různých chemických reakcí, jako jsou oxidace, polymerace a polykondenzace, zesíťování makromolekul, depolymerace a rozklad některých složek materiálů. Tyto reakce probíhají při všech teplotách. S růstem teploty se zvyšuje také rychlost těchto reakcí. O samotné rychlosti stárnutí však nerozhoduje množství přivedené tepelné energie, ale hodnota teploty.

Na materiály často působí pomalá oxidace vzdušným kyslíkem. Účinek této oxidace záleží na **teplotě**, druhu materiálu a přístupu kyslíku k dielektriku. Oxidace pak způsobí strukturální změny a dochází ke vzniku zplodin. Tyto zplodiny mají za následek zvýšení elektrické vodivosti a ztrátového činitele, což je pro izolant nežádoucí. V organických polymerech způsobuje oxidace trhání makromolekul a to má za následek snižování mechanické odolnosti, ale také zhoršení dielektrických vlastností. I zde hraje teplota zásadní roli, protože se vzrůstající teplotou roste i rychlost oxidace těchto polymerů.

Vzhledem k tepelnému stárnutí byl zaveden pojem trvalé tepelné odolnosti izolantů, vyjádřené mezní teplotou. Jinak řečeno, jednotlivé materiály se řadí do tepelných tříd. Zařazení je provedeno na základě výsledků zkoušek zrychleného stárnutí. Souvislost mezi délkou experimentu, neboli dobou života izolace L, a teplotou  $\vartheta$ , při které izolace stárne, vychází z empirického Montsingerova pravidla:

$$L = A \ e^{-m \ \vartheta} \tag{30}$$

kde *L* je doba života izolace, *m* a *A* jsou materiálové konstanty (*A* je doba života při teplotě  $\vartheta = 0 \circ C$ ) a  $\vartheta$  je trvalá teplota stárnutí. Doba života se dá také určit z Arrheniovy rovnice:

$$L = K e^{-\frac{W_a}{kT}}$$
(31)

kde *K* je kmitočtový činitel, úměrný celkovému počtu vzájemných srážek reagujících molekul látky za jednotku času,  $W_a$  je aktivační energie procesu, *k* je Boltzmannova konstanta a *T* je absolutní teplota. [26]

#### 1.3.2 Elektrické stárnutí

Elektrické namáhání je jedním z velmi důležitých faktorů, které ovlivňují stárnutí izolačních systémů. Přesný mechanismus působení elektrického pole na stárnutí izolantu však v současné době není příliš znám. Většina poznatků v tomto směru je spíše empirického charakteru. V současné době jsou používány hlavně dva vztahy popisující vliv elektrického pole na dobu života izolačního materiálu. A to inverzní mocninný model (*IPM – inverse power model*)

$$L = kE^{-n}, (32)$$

$$\log L = \log k - n \log E, \tag{33}$$

nebo exponenciální model:

$$L = c e^{-b E}, (34)$$

$$\log L = \log c - b E, \tag{35}$$

kde L je doba života, E je intenzita elektrického pole a k, n, b, c jsou konstanty, které se určují empiricky a jsou závislé na teplotě a dalších faktorech. Tyto dva modely popisují stárnutí

jakéhokoliv materiálu působením elektrického pole. Zde není nutné znát všechny procesy, které elektrické pole indukuje v materiálu. Dokonce nejsou tyto modely závislé ani na konfiguraci elektrod, struktuře systému a rozložení elektrického pole. Rovnice (32) a (34) jsou pouze empiricky odvozené vztahy popisující působení intenzity elektrického pole na stárnutí materiálu. Avšak výsledky těchto modelů jsou poměrně přesné a vypočtené doby života odpovídají realitě. Grafickým vyjádřením rovnic (32) a (34) v logaritmických nebo semilogaritmických souřadnicích jsou čáry života se směrnicemi  $-\frac{1}{n}$  a  $-\frac{1}{h}$ . Koeficienty *n* a *b* jsou nazývány koeficienty elektrické odolnosti. Velikost těchto koeficientů tedy udává míru odolnosti izolačního materiálu. Tyto koeficienty bývají často označovány za základní parametr, který charakterizuje izolaci. Inverzní mocninný model se v praxi používá pro konstantní namáhání, ale hlavně pro zrychlené degradační zkoušky. Nevýhodou těchto modelů je však to, že selhávají při nízkých hladinách intenzity elektrického pole. To znamená, že existuje prahová intenzita, pod kterou už elektrické pole stárnutí nezpůsobuje.

Elektrickým namáháním se dále zabýval Dakin. K popisu poruch, které jsou způsobeny povrchovými výboji, použil exponenciální model popisující vliv elektrického pole na dobu života izolačního materiálu. Ve svém výzkumu se zaměřil hlavně na pozorování čar života a jejich směrnic. Při svém bádání zjistil, že doba do poruchy je větší než poukazuje rovnice (34). Z toho důvodu Dakin rovnici (34) upravil do tvaru

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{E - E_{\rm t}}{E_{\rm t} - E_0}\right)^{-n},\tag{36}$$

kde  $E_t$  je prahová hodnota intenzity elektrického pole při namáhání,  $L_0$  je doba života pro  $E = E_0$  a  $E_0$  je intenzita elektrického pole při namáhání, u kterého může být vliv elektrického pole zanedbán, kvůli výraznějšímu vlivu jiného faktoru namáhání.

Nový pohled na prahovou hranici stárnutí ji umožnil předložit jako matematicky neurčitelnou dobu života. Prahová hranice stárnutí odpovídá extrémně dlouhé době života při působení malých elektrických polí. To znamená, že jestli se stav izolačního materiálu nachází pod prahovou hodnotou, potom je možné zaručit jeho vysokou spolehlivost. Pro změnu statistického rámce životnostních modelů, s ohledem na velmi krátké doby života, je prahová hranice stárnutí rovněž důležitá. Takový přístup umožňuje spojit životnostní modely s váhou  $\alpha$ , tedy s významem parametru Weibullyho funkce

$$F(t,E) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right]}$$
(37)

kde  $\beta$  je tvarový parametr a *t* je zbývající doba života. Důkazem je experimentální měření mezního namáhání na neparametrických modelech v dlouhých časech. Projevem je různé zakřivení čar života vynesených v logaritmických nebo semilogaritmických souřadnicích. [26], [19]

#### 1.3.3 Kombinované stárnutí

Výsledné namáhání není jen součtem dvou po sobě následujících vlivů. Při působení teploty a elektrického pole současně dochází k degradaci a následnému selhání materiálu (průrazu izolantu) dříve než při působení těchto vlivů jednotlivě. To nastává v případě, že dochází k interakci těchto dvou vlivů. Rozlišují se dva základní druhy interakce:

- Přímá interakce je stav, kdy se jednotlivé působící vlivy navzájem ovlivňují do takové míry, že jejich působení je odlišné od stavu, kdy působí jednotlivě.
   Příkladem přímé interakce je oxidace za zvýšené teploty. Samotné zvyšování teploty nemá na materiál radikální vliv, ovšem za přítomnosti kyslíku značně urychluje oxidační proces. Taktéž samotná oxidace při pokojové teplotě nemá na degradaci vliv.
- Nepřímá interakce je situace, kdy několik faktorů působí současně, ale jednotlivé vlivy zůstávají nezměněny, jakoby působily každý zvlášť. Nepřímá interakce je například působení mechanického namáhání a elektrického pole. Mechanické namáhání totiž může způsobit praskliny, ve kterých se tvoří částečné výboje a dochází tak k rychlejšímu stárnutí materiálu.

Působení více faktorů najednou je nutné zahrnout do matematických modelů. V současnosti se používá hned několik modelů popisujících chování materiálů při **současném působení teploty** a **elektrického pole**. Jsou to například: Simmoniho model, Ramuův model, Fallouův model, Montanariho model, Crineaův model. První tři jmenované modely jsou spíše empirické vztahy, do kterých je potřeba některé konstanty získat experimentálně, kdežto Crineaův model se snaží být plnohodnotnou fyzikální teorií stárnutí. [26]

Kombinovaný životnostní model lze získat také z elektrického životnostního modelu. Ten je základem pro analýzu souboru dat na základě zkoušek životnosti materiálu provedených za určité teploty a s danými intenzitami elektrického pole. Přepsáním na Eyringovu rovnici je

vyjádřen vztah tepelného a elektrického modelu z teplotní reakce rychlosti změny parametru jako funkce elektrického namáhání

$$R(E,T) = k_1 T^{\omega} e^{\left(-\frac{B}{T}\right)} e^{\left[\left(k_2 + \frac{k_3}{T}\right)f(S)\right]}$$
(38)

kde *S* je namáhání (např. elektrické),  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  jsou konstanty závislé na čase, teplotě nebo namáhání a exponent  $\omega \approx 1$ . V případě, že f(S) = 0, pak rovnice (38) přejde v Arrheniovu rovnici (31).

V případě, že je *T* konstantní, tak se logicky jedná jen o elektrické namáhání a rovnice (38) se upraví na tvar

$$R(E) = C' e^{[h f(E)]}$$
(39)

a kde za h a C' se dosadí

$$h = k_2 + \frac{k_3}{T} \tag{40}$$

$$C' = k_1 T^{\omega} e^{\left[-\frac{B}{T}\right]}.$$
(41)

Po dosazení se R(E) rovná době života při elektrickém namáhání. Z rovnice (38) je tedy patrné, že základní vztahy používané pro určování životnosti elektrické izolace jsou funkcemi tepelného a elektrického namáhání. Je třeba zdůraznit, že rovnice (38) je multiplikativní, tzn., že účinky tepelného a elektrického namáhání jsou znásobeny, aby bylo získáno kombinované namáhání. První rovnici, s řádnými okrajovými podmínkami, získal Simoni přeskupením rovnice (38) na tvar

$$L = L_0 e^{(-B \Delta T - h E + b E \Delta T)}, \tag{42}$$

kde *L* je doba života při kombinovaném namáhání,  $L_0$  je doba života bez účinků namáhání, *E* je elektrické namáhání dáno jako  $E - E_0$  nebo  $\log\left(\frac{E}{E_0}\right)$ , podle zvoleného elektrického modelu (exponenciálního nebo mocninného inverzního), *b*, *h*, *B*,  $L_0$  jsou charakteristické koeficienty pro elektrickou izolaci, tedy *B* a *h* jsou koeficienty elektrické a tepelné odolnosti, *b* je koeficient pro rozšíření součinnosti namáhání a  $t_0$  je váha parametru;  $\Delta T$  je tepelné namáhání, které je definováno jako  $\Delta T = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$ , kde  $T_0$  je teplota, pod kterou je možné tepelné namáhání zanedbat. Objev existence prahové oblasti a tím i následné modifikace elektrického životnostního modelu ale znamenal také nutnou modifikaci kombinovaného životnostního modelu. Tato změna se projevila takovým způsobem, že čára života se kloní k horizontále, zatímco namáhání směřuje k prahové hodnotě. Směrnice čáry života u elektrického namáhání při teplotě okolí (pokojová teplota) limituje k nekonečnu, což dokazuje existenci prahové teploty, která je vždy vyšší než teplota okolí. Z toho důvodu je nutné změnit model kombinovaného namáhání přidáním jmenovatele D jdoucího k nule. Namáhání se tak bude blížit prahové hodnotě. Jmenovatel D lze tedy vyjádřit jako

$$D = \frac{s}{s_{\rm t}} - 1 \tag{43}$$

kde *S* je obecné namáhání (v tomto případě tepelné nebo elektrické) a  $S_t$  je prahová hodnota daného namáhání. Hodnotu kombinovaného namáhání udává rovnice (42) a po doplnění jmenovatelem *D* a následnou úpravou nabývá tvaru

$$L = \frac{L_0 e^{(-B \Delta T - h E + b E \Delta T)}}{\frac{T}{T_{t_0}} + \frac{E}{E_{T_0}} - k_c \frac{T}{T_{t_0}} \frac{E}{E_{T_0}} - 1}$$
(44)

kde  $T_{t_0}$  je prahová hodnota T pro E = 0,  $E_{T_0}$  je prahová hodnota E pro T = 273,15 K a  $k_c$  je koeficient ovlivňující tvar rovnoběžných čar získaných z životnostního modelu odpovídajícího hodnotám T a E. Model podle rovnice (44) platí pro materiály, u kterých je možné pozorovat prahové hodnoty, kdežto model podle rovnice (42) platí pro materiály, kde není možné nalézt prahové hodnoty.

Rovnice (42) a (44) je možné za určitých podmínek sloučit v jeden model. Tento sjednocený model pak může být ještě upraven tak, aby byl vhodnější pro praktické příklady. Avšak to vede k celé řadě komplikací, které se projevují hlavně u hladin doby života v případě kombinovaného namáhání. [19]

#### 1.3.4 Zrychlené stárnutí

Podle normy ČSN EN 60505 jsou známy různé úrovně namáhání. Subcyklus stárnutí musí simulovat namáhání, která budou působit v provozu. Při hodnocení elektroizolačního systému může být interakce mezi namáháními významná s ohledem na ovlivnění provozní životnosti. Při definici programu namáhání, která budou použita v průběhu zrychlené zkoušky, mohou

tyto interakce znehodnotit postup vyhodnocení. Před rozhodnutím o programu stárnutí je vhodné provést zrychlené třídící zkoušky s jednoduchým a kombinovaným namáháním, aby mohlo být rozhodnuto o významu těchto interakcí. Jsou-li potvrzeny významné přímé interakce, nebo je-li jejich existence známá z jiných programů hodnocení, mají být, kde je to možné, namáhání subcyklu stárnutí aplikována současně.

Je-li použito cyklické zkoušení, má být nastaven logický vztah mezi délkou cyklu, expozicí stárnutí a předpokládanými provozními namáháními. Doporučuje se délka cyklu při každé expozici namáhání taková, aby u zkoušeného předmětu nedošlo k poruše během deseti cyklů. Uživatel této normy musí stanovit, pro své konkrétní zařízení, hodnoty namáhání způsobující stárnutí. Doba a velikost namáhání mají být pevně určeny se zřetelem na nejlepší využití zkušebních zařízení, která jsou k dispozici.

V subcyklech jednotlivých namáhání jsou zkoušené předměty vystaveny najednou pouze jednomu faktoru. Faktory stárnutí v těchto subcyklech jsou ty faktory z referenčních pracovních podmínek, které působí v provozu samostatně nebo postupně. [5]

#### 1.4 Matematické modely k popisu kombinovaného stárnutí

K přesnějšímu popisu procesu stárnutí materiálů se používají modely stárnutí, které popisují životnost daného materiálu. Při návrhu izolačního systému s předem definovanou mírou spolehlivosti je nezbytné pochopit děje, ke kterým dochází v materiálu během stárnutí. K pochopení těchto dějů slouží matematický nebo fyzikální model. Aby byl takový model dobře sestaven, je nutné znát alespoň některé fyzikálně chemické vlastnosti, například

- teplotu skelného přechodu
- hodnotu aktivační energie
- rychlost pohybu náboje
- vznik prostorového náboje.

Rovněž je důležité znát některé vnější měřitelné projevy, jako například

- doby do průrazu
- průrazná napětí
- izolační odpor.

Matematický popis procesu stárnutí naopak umožňuje předpovědět fyzikální procesy, ke kterým v izolačním materiálu dochází. Zahrnout však do modelu stárnutí všechny destruktivní faktory, které působí na izolační systém, asi nebude nikdy možné.

#### 1.4.1 Crineúv model

Crine vysvětluje proces stárnutí pomocí představy modelu dvojité potenciálové jámy. Energetická bariéra odděluje poruchový stav od provozuschopného. Proto, aby systém přešel z provozuschopného stavu do poruchového, potřebuje dostatečnou energii, aby překonal bariéru. Pravděpodobnost, že získá dostatečnou energii k překonání bariéry, je dána Boltzmanovou statistikou. Elektrické pole výrazně deformuje energetickou bariéru a tak významně napomáhá přechodu z provozuschopného stavu do poruchového. Výška energetické bariéry se na straně provozuschopného stavu snižuje a o stejnou hodnotu se zvyšuje na straně poruchového stavu. Tím se výrazně zvyšuje pravděpodobnost přechodu z jedné polohy do druhé. Čas, který je zapotřebí k přechodu do poruchového stavu, je podle Crinea doba života izolačního systému. Crine uvádí, že střední doba života materiálu je střední doba přechodu energetické bariéry. Střední dobu přechodu lze vyjádřit pomocí zákonů termodynamiky a Boltzmanovy statistiky

$$\tau_{\rm s} = \left(\frac{h_{\rm p}}{k\,T}\right) \, e^{\frac{\Delta W_{\rm a}}{k\,T}} \cosh\left(\frac{q\,\lambda\,E}{k\,T}\right) \tag{45}$$

kde  $\tau_s$  je střední doba přechodu,  $h_p$  je Planckova konstanta, k je Boltzmanova konstanta,  $\Delta W_a$  je volná aktivační energie,  $\lambda$  je vzdálenost mezi oběma stavy – pro daný fyzikální děj a q je elektrický náboj částic ovlivňujících proces stárnutí.



Obr. 7: Model stárnutí materiálu jako dvojité potenciálové jámy

Použití Crineho modelu v praxi je omezené, protože je obtížné určit funkce, ovlivňující velikost parametrů  $\Delta W$  a  $\lambda$ . V tomto je Crineho teorie nedokončená.

V oblasti velmi vysokých intenzit elektrického pole lze vztah zjednodušit, protože  $q \lambda E < k T$  na tvar:

$$\tau_{\rm s} = \left(\frac{h_{\rm p}}{k\,T}\right) e^{\frac{\Delta W_{\rm a} - q\,\lambda\,E}{k\,T}}.\tag{46}$$

Z rovnice (46) je vidět, jak Crine zahrnul do své teorie vliv interakce elektrického pole s tepelným. Snižuje se výška energetické bariéry  $\Delta W_a$  o  $q \lambda E$  a tím se snižuje i střední doba přechodu  $\tau_s$ . Pro oblast velmi vysokých intenzit elektrického pole, tj.  $q \lambda E \ll k T$ , je křivka životnosti spíš exponenciálního tvaru. Naopak v oblasti nízkých intenzit elektrického pole má křivka životnosti jen velmi zvolna klesající charakter, což je v souladu se Simoniho teorií prahové intenzity elektrického pole  $E_0$ .

Pro střídavé elektrické pole  $E_{ST}$  přišel Crine se vztahem:

$$\tau_{\rm s} = \left(\frac{h_{\rm p}}{2\,f\,k\,T}\right) e^{\frac{\Delta W_{a_0}}{k\,T}} \cosh\left(\frac{1}{2}\,\varepsilon_0\,\varepsilon'\,\frac{\Delta V_{\rm F}\,E_{ST}^2}{k\,T}\right),\tag{47}$$

kde  $\Delta W_{a_0}$  je volná aktivační energie pro střídavé elektrické pole,  $\Delta V_F$  je aktivační úroveň procesu při namáhání elektrickým polem a *f* je akcelerační koeficient úměrný kmitočtu. Crine

dále rozváděl své rovnice i pro mechanické namáhání. Crineova teorie vychází z již publikovaných starších prací Eyringa a Wunderlicha. V současné době je nadále upravována. [4], [16]

#### 1.4.2 Simoniho model

Základní rovnice Simoniho modelu pro kombinované elektrické a tepelné namáhání je získána jako součin vztahů popisujících elektrické a tepelné namáhání. Elektrická pevnost zde představuje základní vlastnost pro vyhodnocení stárnutí. Rovnice představuje pokles elektrické pevnosti izolačního materiálu vlivem působení elektrického a tepelného namáhání ve tvaru

$$\left(\frac{E_{\rm p}}{E_{\rm p_0}}\right)^{N+1} = 1 - \frac{t}{L_0 \left(\frac{E}{E_0}\right) e^{B \,\Delta T}},\tag{48}$$

kde  $E_p$  je elektrická pevnost namáhaného materiálu po dobu t,  $E_{p_0}$  je elektrická pevnost nestárnutého materiálu, N je vyjádřeno jako N = n - bT a n je exponent z inversního mocninného modelu,  $\Delta T$  se vypočítá z rovnice  $\Delta T = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$ , b je materiálová konstanta,  $T_0$  je teplota okolí, B je konstanta z Arrheniusova modelu,  $L_0$  je doba života pro  $E < E_0$  a  $T_0$ , E je působící elektrické namáhání a  $E_0$  je namáhání, při kterém může být to elektrické zanedbáno v důsledku jiného většího namáhání.

Pro  $E_p = 0, t = L$  přechází rovnice (48) na rovnici pro kombinované namáhání:

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-N} e^{-B \,\Delta T}.\tag{49}$$

Důležitou vlastností tohoto modelu je jeho přímá návaznost na základní modely stárnutí. V případě, že platí  $E = E_0$ , přechází model na klasický Arrheniův vztah. Ve druhém případě, probíhá li stárnutí při pokojové teplotě, přechází Simoniho model na exponenciální model elektrického stárnutí. [4], [24]

#### 1.4.3 Ramuúv model

Ramuúv model je další z modelů odvozených ze základních vztahů pro tepelné a elektrické stárnutí. Je založen na Eyringově procesu fyzikálně – chemické rychlosti reakce, který předpokládá existenci prahových hodnot elektrického a tepelného stárnutí, pod kterými je

proces stárnutí zanedbatelný. Jedná se o model elektrického stárnutí s teplotní závislostí. Vztah pro Ramuúv model je ve tvaru

$$L = K(T) E^{-n(T)} e^{-B \Delta T},$$
(50)

kde  $K(T) = e^{(K_1 - K_2 \Delta T)}$  a  $n(T) = n_1 - n_2 \Delta T$ , kde *L*, *E*, *E*<sub>0</sub>, *T*<sub>0</sub>, *T*,  $\Delta T$ , *B* mají stejný význam jako v Simoniho modelu a *B*, *K*<sub>1</sub>, *K*<sub>2</sub>, *n*<sub>1</sub>, *n*<sub>2</sub> jsou konstanty zjištěné experimentálně.

Tento model lze vyjádřit i v logaritmické formě

$$\ln L = K_1 - B \,\Delta T - (n_1 - n_2 \,\Delta T) \,\ln E.$$
(51)

V logaritmickém vyjádření je možné zobrazit rovnici (51) jako graf odolnosti vůči elektrickému a tepelnému namáhání. Vyjadřuje stárnutí při konstantní teplotě v závislosti na elektrickém namáhání a naopak stárnutí v závislosti na teplotě při konstantní intenzitě elektrického pole. Směrnice, přímek vyjadřujících stárnutí, je  $n_1 - n_2 \Delta T$ , průsečík s osou doby života je  $K_1 - B \Delta T$ . Tento parametr se snižuje se zvyšující se teplotou. Podobné je to pro přímky vyjadřující dobu života při konstantním elektrickém namáhání. V závislosti na teplotě je směrnice přímky vyjadřující dobu života  $|B - n_2 \ln E|$  a protíná se s osou doby života v bodě  $K_1 - n_1 \ln E$ . [4]

#### 1.4.4 Fallouúv model

Podobně jako v předchozích modelech i tento zahrnuje rovnice pro tepelné a elektrické namáhání. Je opět založen na exponenciálním modelu pro elektrické stárnutí. Je dán rovnicí

$$L = e^{A(E) + \frac{B(E)}{T}}.$$
(52)

Tato rovnice však platí pouze za podmínky, že působí elektrické namáhání, tedy E > 0, kde *A* a *B* jsou konstanty, které se vypočítají  $A(E) = A_1 + A_2 E$  a  $B(E) = B_1 + B_2 E$ . Konstanty  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  se určují experimentálně. Většinou se zjišťují zkouškami zrychleného stárnutí v laboratorních podmínkách při konstantní teplotě. Po dosazení takto vyjádřených konstant do rovnice (52) se dostane vztah

$$L = A \left( e^{A_2 E} e^{\frac{B_1}{T}} e^{\frac{B_2 E}{T}} \right),$$
(53)

kde konstanta A je dána vztahem  $A = e^{A_1}$ . Fallouúv model však neurčuje prahovou hodnotu elektrického namáhání, tedy hodnotu, pod kterou už ke stárnutí nedochází. [4]

#### 1.4.5 Montanariho model

Pravděpodobnostní Montanariho model doby života, také nazývaný obrácený mocninný prahový model, má rozdílný přístup ke stanovení doby života při kombinovaném elektrickém a tepelném stárnutí. Je založen na základě inverzního mocninného zákona v mírně upravené formě

$$L = t_{\rm s} \left(\frac{E}{E_{\rm s}}\right)^{-n}.$$
(54)

Pro zahrnutí prahové hodnoty elektrického namáhání a stoupajícího zakřivení čáry života byla zavedena konstanta *n*, která je závislá na elektrickém namáhání a teplotě

$$n = \frac{n_{\rm c}}{\left(1 - \frac{E_{\rm S} - E}{E_{\rm S} - E_{\rm T}}\right)\nu},\tag{55}$$

kde  $E_{\rm T}$  je práh elektrického namáhání při teplotě *T*,  $E_{\rm s}$  je referenční elektrické namáhání,  $n_{\rm c}$  je koeficient počáteční odolnosti a je funkcí teploty *T* a  $\nu$  je tvarový parametr ( $\nu = \nu(T)$ ). Substitucí váhového parametru s dobou života, vyplývající z inverzního mocninného zákona, ve Weibullově rozdělení se dojde k rovnici:

$$F(t, E, T) = 1 - e^{\left[-\frac{t}{t_{\rm s}}\left(\frac{E}{E_{\rm s}}\right)^n\right]^{\beta(E,T)}},\tag{56}$$

kde  $t_s$  je doba do selhání při elektrickém namáhání  $E_s$  a  $\beta(E,T)$  je tvarový parametr Weibullova rozdělení průrazných napětí. [4]

#### 1.5 Životnost izolací

Norma rozlišuje různé druhy stárnutí, vyskytující se v praxi, jako

- stárnutí při skladování, tedy v době kdy materiál nevykonává ještě svou funkci,
- stárnutí v provozu, kdy materiál koná svoji funkci v provozních podmínkách,
- umělé stárnutí, kdy na materiál působí uměle vyvolané vlivy, simulující provozní stárnutí,

 zrychlené stárnutí - je to umělé stárnutí, při kterém působí na materiál umělé podmínky přísnější než v provozu, z důvodu urychlení vyhodnocení procesu stárnutí izolantu.

Prováděné experimenty se ukázaly, že různé způsoby namáhání mění důležité vlastnosti izolantů, při stárnutí, s časem pokaždé jinak rychle. Tím se budou také mechanické i elektrické vlastnosti měnit jiným způsobem. Změny těchto vlastností jsou závislé na druhu a povaze materiálu, na způsobu jeho použití a namáhání v provozu. Aby bylo možné posoudit, kdy je materiál zestárnut, je třeba zvolit tzv. pozorovaný znak, tedy nějakou technicky (funkčně) důležitou fyzikální vlastnost, která se vlivem stárnutí mění tak výrazně, že je díky této změně možné sledovat časový průběh stárnutí. Další potřebou je, podle zkušeností zvolit určitý stupeň znehodnocení materiálu, neboli kritérium zestárnutí, což je taková mezní (extrémní) velikost pozorovaného znaku, při jejímž dosažení se materiál považuje za nepoužitelný pro svou funkci. U daného izolantu je třeba toto kritérium zvolit s ohledem na celý izolační systém a podmínky jeho použití v určitém elektrickém zařízení, protože se změnou izolačního systému nebo podmínek, v němž pracuje, se mění i kritérium zestárnutí. Například u papíru, lesklé lepenky a bavlny, ponořených v oleji, je důležitým kritériem úbytek mechanické pevnosti a nevhodným kritériem v tomto případě je elektrická pevnost, která se v tomto případě stárnutím mění jen málo.

K experimentálnímu vyšetřování životností organických izolantů se obvykle používá zrychleného stárnutí. Při tomto procesu se z poměrně krátkodobých namáhání odvozují závěry o očekávané době života při dlouhodobé degradaci v provozních podmínkách.

K urychlení stárnutí se nejčastěji používá cyklického namáhání teplotou vyšší než je mezní hodnota odpovídající tepelné třídě. Zkouší se nejméně při třech různých vhodně volených teplotách. K napodobení provozních podmínek se izolant může současně namáhat elektricky, mechanicky nebo klimaticky. [13]

#### Zbytková životnost elektroizolačních systémů

V dnešní době existuje velké množství diagnostických systémů, které mají za úkol zjišťovat stav elektrického zařízení. V elektrotechnice, například ve výkonové elektrotechnice, se rozlišují jednotlivé diagnostické metody pro různé druhy strojů, pro stroje točivé a netočivé, vysokonapěťové a nízkonapěťové; pracující při napětí stejnosměrném, střídavém nebo
pulzním. Samotné systémy pak mohou být pro diagnostiku on-line nebo off-line, přičemž celý diagnostický systém může být navržen jako systém expertní. Všechny diagnostické systémy umí sledovat dané veličiny, například stanovené elektrické parametry, porovnávat jejich hodnotu získanou a zvolenou, a při překročení mezní hodnoty vyslat signál o poruše nebo havárii. Avšak během bezporuchového provozu vyvstává otázka **zbytkové životnosti** zařízení, respektive doby do poruchy. K určení zbytkové životnosti elektrického zařízení je samozřejmě nutné určit zbytkovou životnost izolačního systému. Určení zbytkové životnosti izolačního systému je poměrně složité a proto žádný diagnostický systém neumí tuto dobu jednoznačně stanovit.

Aby bylo možné určit zbytkovou životnost izolačního systému, je nutné znát množství důležitých parametrů. V první řadě jsou to provozní podmínky, ve kterých bude zařízení pracovat. Pro elektroizolační materiál, kterým se zabývá tato diplomová práce, jsou rozhodující činitelé teplota, elektrické pole a relativní vlhkost okolního prostředí. Jejich působení na zkoumaný elektroizolační materiál je popsáno v dalších kapitolách této práce.

Další degradační činitelé, které mají podstatný vliv na zbytkovou životnost zkoumaného izolačního materiálu, jsou různé mechanické vlivy. Mechanické stárnutí ale není předmětem této práce, takže zde nebude podrobněji popsáno.

Hodnoty životnosti se vztahují k provozním podmínkám, kterým bude elektroizolační systém vystaven. Sledována je hlavně doba do poruchy tedy doba do konce technického života EIS (elektroizolačního systému). Dále pak bývá zkoumána doba bezporuchového stavu, případně doba života do dosažení kritéria koncového bodu. Pokud hodnota parametru klesne pod stanovenou mez, tedy pod kritérium koncového bodu, pak může být stanovena doba životnosti. Koncové body bývají voleny dvěma různými způsoby. První možnost spočívá ve sledování procentuálního zvýšení nebo snížení hodnoty sledované vlastnosti od původní úrovně. Tento způsob je vhodný pro porovnání rozdílných materiálů. Jeho nevýhodou však je horší vazba k hodnotám zvolené vlastnosti v normálním provozu. Druhou možností je pevně stanovit hodnotu zvolené vlastnosti. Ta je volena s ohledem na obvyklé provozní požadavky. Pro náhodně zvolenou podskupinu vzorků se provede expozice vzorků při nejnižší teplotě stárnutí po dobu 48 h. Je měřena a zjištěna průměrná hodnota vlastnosti po každém časovém intervalu stárnutí. Z těchto hodnot se potom získá doba pro dosažení koncového bodu.

Elektrické parametry, vhodné pro použití metody koncového bodu, jsou předmětem intenzivního výzkumu. Značné zkušenosti jsou s vývojem elektrických parametrů ve vztahu k tepelnému a elektrickému stárnutí střídavým napětím. Méně zkušeností je se sledováním elektrických parametrů při pulzním namáhání. Nejčastěji používanými parametry pro sledování degradace izolačních materiálů a tedy k předpovědi zbytkové doby života jsou izolační odpor nebo ztrátový činitel.



Obr. 8: Kritérium koncového bodu [27]

Existuje mnoho metod, jak se lze pokusit stanovit zbytkovou životnost EIS. Dojít k přesnému výsledku je však velice složité. Pro jednotlivá namáhání je možné použít matematický model stárnutí, který může být více či méně založen na skutečném degradačním procesu v materiálu. Nebo je možné použít matematický model zohledňující více degradačních faktorů najednou. Výhodou je, že matematický model může být přímo implementován do diagnostického systému. Naměřená data jsou pak dosazována do diagnostického systému a vypočítá se odhadovaná zbytková životnost elektroizolačního systému. Popsat však všechny děje, ke kterým z hlediska působení fyzikálních a elektrochemických procesů dochází, nebude asi nikdy možné. [27]

# 1.6 Navlhavost a nasákavost látek

Při posuzování elektroizolačních vlastností většiny materiálů má významný vliv jejich chování ve styku s vodní párou, popřípadě s plyny a s kapalinami, zejména s vodou. Pro působení vody rozlišujeme dva základní pojmy, navlhavost a nasákavost. Při styku materiálu s vodní parou dochází k navlhavosti – hygroskopičnosti, zatímco při ponoření materiálu do vody se mluví o nasákavosti.

Mimořádně agresivní vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti (zmenšování elektrického odporu, zvyšování ztrátového činitele a pokles elektrické pevnosti) mnohých, a to právě nejrozšířenějších izolantů, je důsledkem toho, že se u nich projevuje vliv vody, která do nich pronikne. Skutečností je, že rozhodující není množství pohlcené vlhkosti, ale navlhnutím vyvolané zhoršení elektrických vlastností, které je u různých izolantů při stejném obsahu vody různé. [13]

### 1.6.1 Vliv vlhkosti na degradaci kompozitních izolantů

Vliv vlhkosti na stárnutí kompozitních materiálů ve vnitřní vrstvě mezi náplní a pryskyřicí ukazuje Cole – Cole diagram. Například materiál bez jakéhokoli ošetření povrchu silonem je velmi citlivý při působení vlhkosti. Korozní mechanismy vedou ke zvýšení ztrát (imaginární část komplexní permitivity) a k povolování pouta výplň – pryskyřice (v extrémních případech až k úplné delaminaci tohoto pouta), protože má slabou soudržnost. Slabá soudržnost může být pozorována jako zvýšení reálné části komplexní permitivity.

Za vnitřní delaminaci se považuje zeslabení odolnosti vůči intenzitě elektrického pole a mechanické síle o 30% v suchých podmínkách. Slabá soudržnost může také za to, že dochází k částečným výbojům podél vnitřního rozhraní ve složených materiálech. Z důvodu zrychleného stárnutí ve vlhkém prostředí nejsou kompozity s neupraveným plněním vhodné pro použití ve venkovních aplikacích. Naproti tomu materiál se silonem ošetřeným vnitřním povrchem má lepší soudržnost vnitřních vrstev a je tedy odolnější proti vlhkosti a tedy použitelnější pro venkovní aplikace.

V každém případě však můžou být vlhkostí indukované korozní mechanismy objeveny, a to s vysokou citlivostí, v pásmu velmi nízkých kmitočtů. Stav zestárnutí kompozitních izolací by měl být pozorovatelný dielektrickými diagnostickými metodami primárně při kmitočtech nižších než 50 Hz. Dielektrická měření v širokém kmitočtovém rozsahu jsou užitečná k rozpoznání fyzikálního základu jevu stárnutí nedestruktivním způsobem. [23]

#### 1.6.2 Navlhavost

Navlhavost je schopnost látek přijímat vlhkost z okolního prostředí. Základním fyzikálním jevem při navlhavosti je adsorpce (proces probíhající na povrchu tuhé látky) molekul vody. Adsorpce je důsledkem působení adsorpčních sil mezi sorbentem (látka přijímající vodní páru) a sorbendem (sorbovaná látka – vodní pára).

Navlhávání je dlouhodobý proces, při němž se v látce, uložené v prostředí o dané stálé relativní vlhkosti a stálé teplotě, zvyšuje postupně počáteční malý obsah vlhkosti v jednotkovém objemu látky. Tento obsah se pak asymptoticky blíží rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá dané relativní vlhkosti okolního prostředí. Rychlost navlhávání je funkcí tlaku vodních par ve vzduchu.

Úroveň rovnovážné vlhkosti látky ovlivňují

- struktura a povaha látky
- relativní vlhkost prostředí
- teplota.

Vlhkost látky je dána množstvím vody, které je obsaženo v jednotkovém objemu látky, za definovaných vnějších podmínek v %:

$$\psi = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \tag{57}$$

kde *m* je hmotnost navlhlé látky a  $m_0$  je hmotnost dokonale vysušené látky. Navlhavost je definována, v případě rovnovážné vlhkosti při normální teplotě vzduchu s relativní vlhkostí  $\varphi = 100$  %, jako:

$$\psi^* = \frac{m^* - m_0}{m_0} \cdot 100 \tag{58}$$

kde  $m^*$  je hmotnost navlhlé látky. [13]

# 1.7 Složené materiály - kompozity

Jsou to materiály představující soustavu (složenou soustavu, směsnou soustavu) tvořenou makroskopickými útvary dvou či více materiálových složek. Složený materiál musí vyhovovat těmto kritériím

- 1. Složená soustava musí být vytvořena člověkem.
- Soustava je tvořena spojením dvou či více materiálů, které mají různé chemické složení se zřetelnou hranicí mezi geometrickými útvary jednotlivých složek.
- 3. Geometrické útvary musí být spojeny v celém objemu.
- 4. Celá složená soustava musí mít vlastnosti odlišné od jednotlivých složek.

Složené materiály se používají především za účelem:

- dosažení výhodnějších mechanických vlastností
- dosažení vyšší tvarové stability
- dosažení výhodnějších tepelných vlastností
- omezení hořlavosti
- zvýšení chemické odolnosti
- zmenšení smrštění a zamezení vzniku dutin a prasklin
- zmenšení nasákavosti
- zlepšení vzhledu povrchu, zejména u výlisků
- snížení výrobních nákladů
- modifikace elektrických (dielektrických) či magnetických vlastností.

Vlastnosti složených materiálů jsou závislé na vlastnostech použitých surovin, závisí však také na množství složek, geometrickém tvaru a orientaci částic složek, uspořádání a rozložení v soustavě. [11]

#### 1.7.1 Dělení složených materiálů

V teorii složených soustav hraje významnou roli způsob vzájemného uspořádání nebo rozdělení částic jednotlivých složek v soustavě. Z tohoto hlediska se rozlišují matriční a statistické složené soustavy.

Podle převažujících částic určitého geometrického tvaru je však výhodné dělit soustavy na

1. vrstevnaté složené materiály

- 2. složené materiály s vláknitými plnivy
- 3. složené materiály plněné částicemi.

Důležitá je (rovněž) směrovost směsných soustav. Směrovost je nutné, buďto zvýraznit, nebo potlačit. Složené materiály se z tohoto pohledu dělí na materiály s izotropními a anizotropními vlastnostmi. [11]

### 1.7.2 Vliv stárnutí na kompozitní materiály

Degradační účinky v polymerních materiálech jsou dobře známé od samého začátku jejich používání ve vysokonapěťových aplikacích. Během posledních let jsou kompozitní izolanty na bázi plněných minerálů a vláken vyztužených epoxidovou pryskyřicí stále více populární, díky jednoduchému navrhování a výrobě. Polymerní materiály jsou svým návrhem velice přizpůsobivé v izolační technice. Na druhé straně však problémy způsobené vlhkostí, částečnými výboji a mechanickým přepětím vedou ke zkracování doby života, tedy výdrže polymerní kompozitní izolace jako takové. Pro ekonomický design je velice důležité znát hlavní stárnoucí mechanismy a jejich vlivy na elektrické a mechanické parametry materiálu. Hlavním problémem je přesná znalost stavu degradace a zbývající doby života použitého materiálu ve specifické izolaci.

Vícevrstvé izolace se skládají z organické polymerní matrice (formy) vyztužené minerálním práškem, skleněným vláknem nebo křemičitanem. Všechny kompozitní materiály mají jednu věc společnou, a to velkou vnitřní mikroskopickou plochu mezi výplní a pryskyřicí (pojivem). Tato plocha je nejslabší částí složených materiálů. Kvalita materiálu tedy evidentně závisí na přilnavosti mezi výplní a pryskyřicí. Slabá přilnavost vede ke zrychlenému zestárnutí vlivem vlhkosti, částečných výbojů nebo elektromechanických sil.

Měření komplexních dielektrických konstant v širokém kmitočtovém rozsahu může pomoct k pochopení fyzikálních zákonitostí mechanismů stárnutí a poskytnout tak více informací o stavu znehodnocení materiálů. [23]

# 1.8 Elektrické diagnostické metody zjišťování stavu izolačních materiálů

Elektrické diagnostické metody ke zjišťování stavu elektroizolačních tuhých izolantů lze rozdělit na stejnosměrné měřicí metody a střídavé měřicí metody. Asi nejvíce využívanou metodou z oblasti stejnosměrných metod je měření absorpčních a resorpčních charakteristik,

jinak řečeno měření nabíjecích a vybíjecích proudů v závislosti na čase. Střídavých měřicích metod je hned několik hodně využívaných. Patří sem například metoda Scheringova můstku, metoda čtyřkapacitního můstku, metoda automaticky vyvažovaného můstku a rezonanční metoda měřením nakmitaného napětí (Q-metr). U střídavých měřicích metod se sleduje ztrátový činitel tg  $\delta$  a paralelní kapacita (většinou)  $C_x$ .

# 1.8.1 Metoda měření absorpčních a resorpčních charakteristik

Je to metoda, při které se měří nabíjecí a vybíjecí proud, procházející vzorkem. Vyhodnocení absorpční a resorpční charakteristiky poskytuje cenné údaje. Jedná se o určení izolačního odporu  $R_X$ , polarizačních indexů  $p_{i1}$ ,  $p_{i10}$ , dalších parametrů, kterými jsou redukované resorpční křivky (RRK) a velikosti ploch pod absorpčními i resorpčními křivkami. Důležité je, aby zdroj pro tato měření byl dostatečně stabilní. Pro měření odporu se nejčastěji používá voltampérová metoda neboli přímé čtení procházejícího proudu. Zjišťovaný odpor  $R_X$  se vypočítá jako podíl stejnosměrného přiloženého napětí a celkového protékajícího proudu v daném čase.

Další získávané parametry z absorpčních a resorpčních charakteristik jsou výše zmiňované polarizační indexy, které se často využívají pro svou dobrou výpovědischopnost. Pro popis stavu materiálu využívají časovou proměnnost absorpčního proudu. Polarizační indexy jsou nezávislé na rozměrech měřených předmětů. Vypočítají se ze vztahu

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{15} + i_{\infty}}{i_{60} + i_{\infty}},\tag{59}$$

kde  $i_{15}$  a  $i_{60}$  jsou absorpční proudy v 15. a 60. sekundě a  $i_{\infty}$  je ustálený vodivostní proud.

Hodnocení absorpce a resorpce lze provádět také vyjádřením (integrací) plochy pod absorpční, případně resorpční křivkou. V případě ideálního sledovaného průběhu absorpčního nebo resorpčního proudu, lze určit tuto plochu analytickou metodou, což je možné pouze v teoretické rovině. V praxi se využívá některá numerická metoda. [16]

# 1.8.2 Metoda Scheringova můstku

Můstek se skládá ze dvou hlavních částí. Z první části, jejíž prvky jsou umístěny ve vysokonapěťové části zkušebny a druhé části sloužící k vyvažování mimo vysokonapěťovou

část. Kapacitní normál a vzorek potom tvoří galvanické oddělení obou částí. Vzorek musí být vložen v příslušném elektrodovém systému.

Nízkonapěťová část slouží k nastavení rovnováhy. K vyvažování slouží odporová dekáda  $R_3$ a kapacitní dekáda  $C_4$ . Dekáda  $R_3$  vyvažuje odporovou složku sériového náhradního odporu a dekáda  $C_4$  vyvažuje kapacitní složku. Rovnovážný stav indukuje nulový indikátor N. Nízkonapěťová část musí být stíněna, protože elektromagnetická parazitní pole mohou mít vliv na přesnost měření. Schéma můstku je znázorněno na obr. 9. [16]



Obr. 9: Scheringův vysokonapěťový můstek [16]

# 1.8.3 Metoda čtyřkapacitního můstku

Tento můstek se odlišuje od Scheringova můstku tím, že má ve všech větvích kapacity. Tato skutečnost má za následek zvýšenou impedanci ve všech větvích, a tím vyšší citlivost a přesnost měření. Má vlastní zabudovaný napájecí zdroj, který zaručuje čistý sinusový průběh napájecího napětí. Parazitní kapacity přívodů a měrných kondenzátorů, které mohou ovlivnit měření, jsou odstraněny zabudovaným stíněním a vestavěným poloautomatickým regulátorem.

Vyrovnání můstku signalizuje elektronický nulový indikátor, který má regulovatelnou citlivost. Kapacitní dekáda  $C_4$  vyrovnává měření neznámé kapacity  $C_X$ . Ztráty vzorku jsou vyrovnávány odporovou dekádou  $R_3$  a vodivostní dekádou  $G_3$ . Hodnota ztrátového činitele tg  $\delta$  se odečítá přímo na příslušných prvcích můstku. Schéma můstku je znázorněno na obr. 10.



Obr. 10: Schéma zapojení Scheringova čtyřkapacitního můstku

#### 1.8.4 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát

Slouží k automatickému zobrazení tg $\delta$  a  $C_X$ . Vychází z principu klasického Scheringova můstku.

Oproti konvenčním můstkům nemusí být tento úplně vyvážen, protože se vlastně měří fázový úhel mezi dílčími napětími. Jako kapacitní děliče slouží samotné větve můstku. Ztrátový činitel tg  $\delta$  se určuje z fázového úhlu mezi napětími na kondenzátorech  $C_{\rm M}$  a  $C_{\rm R}$ . Tato napětí jsou digitalizována senzory 1 a 2 a signály jsou dále přenášeny do počítače, kde se zpracují za použití rychlé Fourierovy transformace – je určen tg  $\delta$ .  $C_{\rm X}$  se pak určuje z dělícího poměru měřicí větve.

Chyby vzniklé rozptylovými kapacitami jsou eliminovány tím, že v nízkonapěťové části můstku jsou použity kromě odporů i kondenzátory. Schéma můstku je znázorněno na obr. 11. [16]



Obr. 11: Schéma automatického můstku pro měření dielektrických ztrát [16]

#### 1.8.5 Rezonanční metoda měřením nakmitaného napětí (Q-metr)

Tato metoda se používá pro měření v oblasti vysokých kmitočtů, 10 kHz až stovky MHz. Přístrojem pro měření je Q-metr, neboli přístroj pro měření obecných impedancí. Při měření je zjišťován činitel kvality Q, tedy podíl nakmitaného napětí na reaktanci obvodu a vstupního napětí ze zdroje. Proměřované dielektrikum v měrném kondenzátoru zapojeném v sériovém rezonančním obvodu je měřenou impedancí. Ztrátový činitel tg  $\delta$  je určován jako rozdíl kvality rezonančního obvodu Q s připojeným a bez připojeného vzorku.

Měrný obvod MO je sériový rezonanční obvod, který se skládá z měrného laditelného kondenzátoru  $C_L$ , v sérii se svorkami  $L_X$ , kde se připojuje při měření tg  $\delta$  pomocná cívka s takovou hodnotou, aby rezonovala při daném kmitočtu. Na svorky  $C_X$  se paralelně k laditelnému kondenzátoru  $C_1$  připojuje mikrometrický měrný kondenzátor s měřeným dielektrikem.

Princip měření spočívá v substitučním měření ztrát kondenzátoru  $C_d$  na základě měření činitele jakosti Q obvodu v rezonanci. Měření tg  $\delta$  probíhá měřením Q obvodu s připojeným vzorkem dielektrika. První měření probíhá s připojeným vzorkem a druhé měření bez připojeného vzorku. Při prvním měření je změřeno  $Q_1$  při vzdálenosti elektrod mikrometrického kondenzátoru  $d_1$ , která je tloušťkou vzorku. Druhé měření, tedy měření bez připojeného vzorku, probíhá tak, že je změřena hodnota  $Q_2$  a zmenšená hodnota  $d_2$ , při níž se obvod rozkmitá do rezonance. Schéma rezonanční metody je uvedeno na obr. 12.



Obr. 12: Schéma rezonanční metody

### 1.9 Dielektrická relaxační spektroskopie (DRS)

Pro správnou aplikaci materiálů v elektrotechnických zařízeních je nezbytná dokonalá znalost jejich vlastností. Chování látek na základě jejich vlastností je potom odvozováno od

fyzikálních a chemických zákonů nebo chemických procesů. Z tohoto důvodu je nezbytné využívat nové poznatky, ale také nové experimentální metody. Preferovány jsou samozřejmě metody nedestruktivní.

#### 1.9.1 Princip dielektrické relaxační spektroskopie

Jednou z moderních experimentálních nedestruktivních metod, používaných v diagnostice, je dielektrická relaxační spektroskopie. Je to metoda na rozhraní fyziky, chemie a materiálového inženýrství, kterou je možné použít ke studiu různých materiálových soustav.

Jejím principem je sledování odezvy polarizace na změny elektrického pole. Polarizační relaxační jevy je možné sledovat, buď ve střídavém elektrickém poli, a to měřením kmitočtových závislostí složek komplexní permitivity  $\varepsilon'(\omega)$  a  $\varepsilon''(\omega)$  v širokém kmitočtovém pásmu, anebo ve stejnosměrném elektrickém poli. Ve stejnosměrném elektrickém poli se pak jedná o měření časových závislostí nabíjecích a vybíjecích proudů i(t). Z toho vyplývá, že materiály se pomocí dielektrické relaxační spektroskopie dají studovat v kmitočtové a časové oblasti. Výsledky z obou těchto oblastí jsou fyzikálně ekvivalentní, což znamená, že jsou navzájem převoditelné různými numerickými operacemi. Za účelem kontroly linearity izolačního systému pro transformaci naměřených hodnot z časové do kmitočtové oblasti se měří vybíjecí proud při několika různých napěťových úrovních. V případě linearity systému se potvrdí nezávislost funkce odezvy na velikosti aplikovaného elektrického pole. Převod mezi kmitočtovou a časovu oblastí se nejčastěji provádí Fourierovou transformací. Dále se k tomuto převodu používá Laplaceova transformace nebo zjednodušená Fourierova transformace nazývaná Hamanova aproximace.

Dielektrická relaxační spektroskopie se používá pro studium různých materiálových soustav, a to od plynů až po různé druhy pevných látek. Je vhodná například pro studium makromolekulárních látek, kde je možné analýzou kmitočtových a teplotních průběhů posoudit míru pohybu makromolekul v elektrickém nebo tepelném poli. Pomocí dielektrické relaxační spektroskopie se o dielektriku získá mnoho údajů, jako například koncentrace dipólů, rychlost reakce dipólů na vnější pole, charakter pohybu dipólů a mnohé další. [14]

### 1.9.2 Druhy relaxačních mechanismů

V každém dielektriku existuje více nosičů náboje (ionty, elektrony, dipóly). Tyto nosiče vykonávají různé pohyby, a proto v dielektriku existuje několik relaxačních mechanismů.

Každý relaxační mechanismus je charakterizován relaxačním kmitočtem  $f_d$ , intenzitou relaxace  $\Delta \varepsilon$  a tvarem relaxační funkce. Při nízkých kmitočtech se dipóly pokouší vyrovnat s působením střídavého pole, ale v oblasti vysokých kmitočtů jim přeorientování jejich setrvačnost nedovolí, a proto se snižuje relaxace a také  $\varepsilon'$ . Relaxační kmitočet  $f_d$ , pozorovaný jako vrchol ztrátového čísla  $\varepsilon''$ , pak charakterizuje maximální ztrátu energie a zároveň ztrátu dynamického pohybu molekuly. Kmitočtová a teplotní závislost komplexní permitivity bývá často popisována fenomenologickým vztahem Havriliak – Negamiho viz. rovnice (29).

Relaxační spektrum, tedy jeho tvar a síla, závisí na teplotě. Při různých teplotách se mění poloha relaxačních maxim, jejich velikost a tvar. Teplotní závislost dielektrické relaxace se dá popsat pomocí teplotní závislosti jednotlivých parametrů, mezi něž patří  $f_0$  a  $\tau_0$ . Relaxační mechanismy se označují písmeny řecké abecedy  $\alpha, \beta, \gamma$  atd. Při konstantní teplotě se první, tedy při nízkých kmitočtech, vyskytuje  $\alpha$  relaxace (primární relaxace) a  $\beta$  relaxace (sekundární relaxace) je hned další vyskytující se relaxační mechanismus při vyšších kmitočtech. Při sledování teplotní závislosti ztrátového čísla je tomu přesně naopak.

## 1. *α* relaxace

Pro relaxaci tohoto typu je charakteristické, že má silně kooperativní charakter. To znamená, že k pohybům dipólů nedochází jednotlivě, ale současně s pohybem vedlejších dipólů. Tato relaxace existuje ve dvou tzv. módech, a to v normálním módu (změna orientace dipólů) a segmentovém módu (změna orientace pevně zakotvených dipólů v řetězci nebo kolmo na něj). K popisu chování  $\alpha$  relaxace slouží Vogelův – Fulcherův – Tammannův zákon

$$f = f_0 \ e^{-\frac{B}{T - T_0}}.$$
 (60)

#### 2. $\beta$ relaxace

Pro sekundární relaxaci je naopak typické, že není kooperativní. Charakterizuje ji tedy lokální pohyb jednotlivých dipólů bez jakýchkoli vzájemných interakcí. Je pro ni typická symetričnost a velká šířka relaxačního maxima v kmitočtové závislosti ztrátového čísla. Dalším typickým rysem, je teplotní závislost kmitočtu popsaná upravenou Arrheniovou rovnicí ve tvaru

$$f = f_0 e^{-\frac{W}{kT}}.$$
(61)

### 3. Relaxace vyšších řádů

Ve většině látek se vyskytují i jiné relaxační mechanismy, které se označují dalšími písmeny řecké abecedy, např.  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$  aj. Jejich příčiny jsou pro různé látky různé. Jejich společným rysem je nižší aktivační energie než u  $\beta$  relaxace. [20], [31]

#### 1.9.3 Distribuce relaxačních kmitočtů metodou DRS

V poslední době se ukázalo, že tím pravým měřítkem pro distribuci relaxačních kmitočtů je logaritmické měřítko. Poukazuje totiž na to, že jde vlastně o distribuci aktivačních energií. Tyto energie souvisí s kmitočtem v Arrheniusově rovnici pro izotermické podmínky. Pomocí těchto podmínek byl formulován nový přístup k dielektrické relaxaci, umožňující číselný výpočet distribuce relaxačních kmitočtů, podložený experimentálními daty vzatými z časové nebo kmitočtové oblasti.

Relaxační chování v mnoha systémech (fyzický, biologický, chemický atd.) může být popsáno Debyeho relaxační rovnicí

$$P_{(t)} = P_0 \ e^{(-f_d t)}, \tag{62}$$

kde  $f_d$  je relaxační kmitočet a  $P_0$  je nasycená polarizace. Ve skutečných materiálech, relaxace pro konkrétní druh dipólového momentu jakoby postupuje, spíše než že by zde byl jediný relaxační kmitočet. Dynamické chování relaxační polarizace může být zkoumáno ekvivalentně v časové nebo v kmitočtové oblasti. V časové oblasti se připojí napětí po dostatečně dlouhou dobu a měří se změna polarizace v čase (neboli vybíjecí proud, resp. nabíjecí proud). Podle Debyeho je tento proud,

$$I_{(t)} = \frac{dP_t}{d_t} = -f_d P_0 e^{(-f_d t)}.$$
(63)

Alternativou je měření kmitočtové závislosti komplexní permitivity, v kmitočtové oblasti. Ta je dána Debyeho rovnicí (20). [6]

# 1.9.4 Časová oblast DRS

Je li dielektrický materiál vložen do elektrického pole, dojde ke zpolarizování materiálu. Elektrická polarizace v dielektrickém materiálu může být rozdělena na dvě části. První část představují polarizace rychlé (elastické) a druhou pak polarizace pomalé (relaxační). Lze tedy psát

$$P_{(t)} = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1) E_{(t)} + \Delta P_{(t)} = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1) E_{(t)} + \varepsilon_0 \int_0^t f_{(\tau)} E(t - \tau) d\tau.$$
(64)

Rychlá polarizace následuje přiložené elektrické pole, zatímco pomalá se skládá z křivkového integrálu mezi aplikovaným elektrickým polem a funkcí nazývanou dielektrická odezvová funkce  $f_{(t)}$ . Dielektrická odezvová funkce představuje určitý druh paměti dielektrického materiálu a má následující charakteristické rysy:

$$f_{(t)} \equiv 0 \ \forall \ t < 0, \lim_{t \to \infty} f_{(t)} = 0.$$
(65)

Celková proudová hustota dielektrického materiálu v elektrickém poli může být vyjádřena shodně s Ampérovým zákonem jako

$$J_{(t)} = \sigma_0 E_{(t)} + \varepsilon_0 \frac{\partial E_{(t)}}{\partial t} + \frac{\partial P_{(t)}}{\partial t} = \sigma_0 E_{(t)} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \Big\{ \varepsilon_\infty E_{(t)} + \int_0^t f_{(\tau)} E(t-\tau) d\tau \Big\}.(66)$$

Pomalé polarizační procesy v materiálech nemohou být měřeny přímo, ale měření polarizačního a depolarizačního proudu (nabíjecího resp. vybíjecího proudu) v časové oblasti teprve dovolí vyšetřit pomalé polarizační procesy v dielektrických materiálech. Intenzita elektrického pole u homogenních materiálů může být ovlivněna vnějším napětím  $u_{(t)}$ . Pak můžeme z rovnice (66) vyjádřit proud  $i_{(pol)}$  jako:

$$i_{(\text{pol})} = C_0 \left[ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} u_{(t)} + \varepsilon_0 \frac{du_{(t)}}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) u_{(\tau)} d\tau \right], \tag{67}$$

kde  $C_0$  je geometrická kapacita. Polarizační proud  $i_{pol}(t)$  při krokovém napětí  $U_c$  a t = 0může být vyjádřen rovnicí

$$i_{(\text{pol})}(t) = C_0 U_c \left[ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + f_{(t)} \right].$$
 (68)

Díky krokovému napětí  $U_c$  je polarizační proud složen ze dvou částí. Jedna část se týká vodivosti testovaného objektu a druhá část souvisí s aktivitou různých polarizačních procesů uvnitř testovaného objektu. Pokud je po době  $t_c$  odpojeno krokové napětí  $U_c$  a testovaný objekt je okamžitě uzemněn, pak protéká depolarizační proud. Tento proud představuje

relaxaci polarizačních procesů. Podle principu superpozice je depolarizační proud po spojení nakrátko dán

$$i_{\rm depol}(t) = -C_0 U_c [f_{(t)} - f(t + t_c)],$$
(69)

kde  $f_{(t)}$  je rozložená monotónní funkce a  $t_c$  je časový úsek po odstranění  $U_c$ . Část rovnice (69) je zanedbatelná pro velké hodnoty  $t_c$  a depolarizační proud se stává úměrným dielektrické odezvové funkci, potom lze psát

$$f_{(t)} \approx -\frac{i_{\rm depol}}{c_0 \, U_{\rm c}}.\tag{70}$$

Z rovnic (68) a (69) lze vyjádřit stejnosměrnou vodivost  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_c} \left[ i_{\text{pol}}(t) + i_{\text{depol}}(t) \right].$$
(71)

Každý dielektrický materiál má svou vlastní dielektrickou funkci odezvy. Typické odezvové funkce představují pomalé polarizační procesy. [7]



**Obr. 13**: Různé typy dielektrické odezvové funkce  $f_{(t)}$  v časové oblasti [7]

#### 1.9.5 Kmitočtová oblast DRS

Ekvivalentní metoda ke studiu relaxačních polarizací a jejich projevů v kmitočtové oblasti se sinusovou excitací. Od sinusových excitací se odvozují Fourierovy transformace z rovnice (67).

$$I_{(\omega)} = C_0 \left[ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} U_{(\omega)} + i \omega \varepsilon_{\infty} U_{(\omega)} + i \omega \chi_{(\omega)} U_{(\omega)} \right],$$
(72)

kde  $\chi_{(\omega)}$  je Fourierova transformace dielektrické odezvové funkce a je definována jako komplexní dielektrická susceptibilita. Fourierova transformace pak slouží jako prostředek převodu mezi časovou a kmitočtovou oblastí. Jestliže je dielektrický materiál lineární, homogenní a izotropní, platí princip superpozice vyplývající ze vztahu mezi časovou a kmitočtovou oblastí

$$f_{(\omega)} = \int_0^\infty f_{(t)} \, e^{i\,\omega\,t} dt = \chi_{(\omega)} = \chi'_{(\omega)} - i\,\chi''_{(\omega)}.$$
(73)

Celkový proud v dielektrickém materiálu pod napětím  $U_{(\omega)}$  může být vyjádřen jako

$$I_{(\omega)} = i \omega C_0(\varepsilon' - i \varepsilon'') U_{(\omega)} = i \omega C_0 \varepsilon^* U_{(\omega)}, \qquad (74)$$

kde  $\varepsilon^*$  je komplexní permitivita. Ve většině případů se využívá právě komplexní permitivita, nikoliv komplexní susceptibilita. [7]

#### 1.10 Trendy v namáhání elektroizolačních materiálů

Izolační systém je nejslabším článkem ve spolehlivostním řetězci elektrického zařízení. Je tedy zapotřebí podle toho koncipovat diagnostický systém, který má zjišťovat stav elektrického zařízení. Životnost izolačního systému je možné určovat také zrychleným stárnutím materiálu, ze kterého je izolační systém sestaven. Tato diplomová práce se zabývá právě zrychleným stárnutím jednoho druhu, avšak velice často používané, drážkové izolace. Kde se zkoumaný materiál přesně používá je uvedeno v kapitole věnující se zkoumanému materiálu. Tato práce se konkrétně zabývá jeho tepelným, elektrickým a kombinovaným (elektrickým a tepelným) namáháním. Drážková izolace však není jediným prvkem, který musí v provozu odolávat těmto namáháním. V současné době se provádí zrychlené stárnutí mnoha typů izolačních materiálů a to nejen drážkových izolací. Vzhledem k zaměření práce

se tato kapitola bude věnovat současným trendům ve výzkumu elektroizolačních materiálů používaných v elektromotorech nebo točivých stojích.

Mezi hlavní aktuální témata patří především zkoumání kombinovaného namáhání (kombinace elektrického a tepelného namáhání nebo expozice ultrafialovým zářením) různých složených či polymerních izolací, dále zkoumání částečných výbojů způsobujících stárnutí a fenoménu v elektroizolačních materiálech, tzv. elektrických stromečků.

# 1. Částečné výboje, jejich analýza a měření v současné době

Částečné výboje, jejich měření a následná analýza, jsou jedním z nejdůležitějších a výpovědischopných nástrojů současné elektrotechnické diagnostiky. Měření částečných výbojů se využívá pro hodnocení vlastností elektroizolačních systémů elektrických strojů a přístrojů. Částečné výboje jsou většinou analyzovány ve vztahu k fázi napájecího napětí, amplitudě, četnosti, zdánlivého náboje apod. Ke vzniku částečných výbojů dochází, buď přímo v izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a železem statoru (drážkové výboje), nebo na povrchu izolace.

V současné době se u nás nebo i ve světě provádí výzkumy působení částečných výbojů, protože urychlují degradaci izolačních materiálů. Zkoumá se například vysokokmitočtové pulzní namáhání, které způsobují třeba měniče kmitočtu. Při vysokokmitočtovém pulzním namáhání dochází ke zvýšené aktivitě částečných výbojů. Měří se výbojová činnost během procesu stárnutí izolačního materiálu.

Další výzkumy jsou zaměřeny například na vliv tvaru napěťových impulzů na rychlost stárnutí izolace. Cílem je ověřit vliv strmosti jednotlivých napěťových pulzů na životnost izolačního systému. Zde se dospělo k poznatku, že se vzrůstající strmostí napěťových pulzů se zkracuje doba životnosti elektroizolačního systému.

V současné praxi se pro měření částečných výbojů používají nejmodernější digitální měřicí systémy, které jsou plně řízeny počítačem. Zaznamenané částečné výboje jsou v digitální formě vyhodnoceny a roztříděny podle velikosti jednotlivých pulzů, fáze jejich výskytu vzhledem k fázi zkušebního napětí a četnosti výskytu jednotlivých pulzů. [15], [18], [21], [29]

# 2. Kombinované namáhání různých kompozitních, polymerních izolací

V současné době je zkoumán vliv kombinovaného namáhání na různé druhy kompozitních izolací pro různé využití a aplikace. Jedním z nejčastějších témat je kombinované stárnutí složené soustavy používané jako drážková izolace v elektrických točivých strojích. Tento výzkum je veden již řadu let u nás i v zahraničí. Toto téma je však stále aktuální, a proto je mu věnována i tato diplomová práce.

Jedním z nejčastěji se objevujících témat je v současnosti vliv vícefaktorového namáhání na venkovní kompozitní izolace a pryžové izolace vodičů. Zkoumán byl například vliv dlouhodobého vícefaktorového namáhání na kompozitní pryžově silikonovou izolaci, která byla vystavena zvýšené teplotě a elektrickému namáhání v přítomnosti UV záření. Ve speciálně postavené komoře byly vzorky vystaveny výše uvedeným vlivům po dobu 12 000 hodin. Bylo zjištěno, že toto kombinované namáhání způsobilo zdrsnění povrchu izolace a zvýšilo se hmotnostní procento kyslíku v materiálu. Výsledek této studie ještě není konečný, protože experiment stále pokračuje.

Další výzkumy se zabývají například studiem vícefaktorového namáhání na termoplastické elastomery a termosety (silikon, pryž) používané rovněž jako izolace venkovních vodičů vysokého napětí. Byly simulovány provozní podmínky, kterým bude materiál izolace vystaven. Tyto podmínky obsahují působení elektrického pole, vysoké teploty, UV záření, solných mlh a kyselého deště. K vyhodnocení byly použity metody, jako Fourierova transformace infračervené spektroskopie (FTIR) nebo skenovací elektronová mikroskopie (SEM). Výsledek těchto metod by měl rozhodnout, který polymerický materiál je nevhodnější do prostředí, ve kterém působí výše uvedené provozní podmínky. Simulace dlouhodobého zrychleného vícefaktorového namáhání polymerických izolátorů provozními podmínkami, napomáhá lépe pochopit mechanismy způsobující stárnutí použitých materiálů. [2], [25], [30]

### 3. Elektrické stromečky

Jedním z problematických jevů, který významným způsobem ovlivňuje spolehlivost elektrických zařízení, jsou elektrické stromečky. Jsou to útvary stromovitého nebo keřovitého tvaru, které vznikají uvnitř elektroizolačního materiálu. Jedná se o degradační jev, který může vést až k průrazu elektroizolačního materiálu. V materiálu elektrické izolace vlivem působení elektrického pole vznikají vodivé cesty – kanálky směrem k místu s jiným potenciálem.

Dostatečná intenzita elektrického pole pro vytvoření elektrického stromečku vzniká na místě "ostré hrany". To může být například přimísená nečistota v materiálu nebo i vniknuvší ostrý předmět.

V současné době je zkoumán například vliv izolačního materiálu - slídové pásky pro vysokonapěťové izolační systémy, na rychlost růstu elektrického stromečku. Slídová páska je použita jako dielektrická bariéra. Prostředím, kde stromeček vzniká, je epoxidová pryskyřice. Provedený experiment potvrzuje, že růst stromečku je druhem materiálu bariéry ovlivňován. Jedná se o první nahlédnutí do problematiky vzniku a šíření elektrických stromečků v izolačních páskách pro točivé stroje. Byly získány dílčí znalosti o vlivu materiálu bariéry na růst elektrického stromečku. [28]

# 2 Experimentální a měřící část

# 2.1 Drážková izolace Isonom NMN

Zkušební vzorky byly připraveny z materiálu ISONOM<sup>®</sup> NMN, který se skládá z papíru NOMEX a tenkého filmu vytvořeného z PET (polyethyléntereftalátu). Laminátový materiál ISONOM<sup>®</sup> typu NMN je vrstvená deska, skládající se z kalandrovaného papíru NOMEX a tenkého polyesterového filmu, který je vysokoteplotně odolným lepidlem nalepen na papíru z obou jeho stran. Tato vrstvená deska je navržena tak, aby se nerozpadla, nebo se na ní nevytvořily puchýře při namáhání vysokou teplotou. Spadá do tepelné třídy 155 °C. Polyesterový film přispívá, jak k vysoké izolační pevnosti, tak i k velice dobrým mechanickým vlastnostem. Mezi jeho dobré mechanické vlastnosti patří vysoká pevnost v tahu a vysoká odolnost proti přetržení nebo natržení.

Materiály typu 0881 a 0883 mají hladký povrch, díky kterému je možné je strojově navíjet při výrobě nízkonapěťových motorů. Typ 2035 je vysoce pružný s pohlcujícím povrchem. Typ 2045 je tlakově přizpůsobivý, proto najde uplatnění v mnoha rozdílných aplikacích. Z předešlých informací vyplývá, že tento materiál je široce využíván při výrobě motorů a generátorů mnoha velikostí a tepelných tříd. Nejčastěji se používá k výrobě drážkové izolace, klínů nebo k izolování fází motorů a generátorů. Výrobci motorů se snaží motory upravit tak, aby byly vhodné právě k použití typu NMN a tím zavést používání jednotných izolačních materiálů pro všechny typy motorů.

ISONOM<sup>®</sup>NMN můžeme skladovat neomezeně dlouho za splnění podmínek: 20 °C, 50 % relativní vlhkost. [8]

jmenovitá tloušťka	[mm]	0,36	
tolerance	[mm]	± 0,02	
plošná hmotnost	g m <sup>-2</sup>	478	
průrazné napětí	kV	20	
průrazné napětí po skládání	kV	18	
tažná síla podélná/příčná	N/10mm	340/300	
prodloužení podélné a příčné	%	≥ 20	
tepelná třída	°C	155 °C	

Tab. 1: Parametry materiálu ISONOM<sup>®</sup>MNM typu 0881

#### 2.1.1 NOMEX

NOMEX<sup>®</sup>, je vyráběn, buď jako lepenka, nebo papír. Chemicky je to aromatický polyamid, obecně známý jako aramid. Molekulární struktura tohoto materiálu je zvláště stabilní, což je vlastně příčinou jeho vlastností, kterými jsou vysoká elektrická, chemická a mechanická odolnost.

Papír je vytvořen ze dvou forem aramidového polymeru, neboli z malých vláken, která jsou vázána částicemi. Vláknina, která tvoří zrnité mikroskopické filmy poskytující dielektrickou pevnost, působí jako vazač. To všechno je pak smícháno s krátkými vlákny (vločkami), která jsou řezána přesně na stanovenou délku ze žhavicího vlákna. Tyto dvě součásti (vločky a malá vlákna polymeru) jsou pak slučovány ve vodě ve formě kalu, ze kterého jsou na speciálním papírenském stroji vylisována v jeden list papíru. Ze stroje však vyjíždí jen papír s malou hustotou a průměrnými mechanickými vlastnostmi. Zlepšení elektrických a mechanických vlastností je dosaženo následným zhuštěním a vnitřním slepením. To se provádí prostřednictvím vysokoteplotního kalandrování (vyhlazení pod určitým tlakem). Výsledný papír je mechanicky odolný, pružný a má dobré elektrické vlastnosti, které je schopen udržet i při vysokých teplotách.

Důležitou vlastností Nomexu je také jeho snášenlivost se všemi druhy materiálů na bázi laků a pryskyřic, které se běžně používají v elektrotechnice. Rovněž se snáší s minerálními a syntetickými oleji, které se používají v transformátorech. K aplikaci v tepelně namáhaných elektrických strojích ho předurčují vynikající vlastnosti, které si zachovává i při působení vysokých teplot.



**Obr. 14**: Strukturní vzorec papíru NOMEX<sup>®</sup> meta-aramid (metaphenyleneisophthalamide)[9]

Nomex se využívá především k elektroizolaci transformátorů - izolaci vrstev, závitů, přívodů a sekcí a v oblasti točivých strojů - vodiče, cívky, drážky, vývody motorů. Mimo jiné se používá např. na kostry cívek nebo vysekávané a tvarované součástky.

$E_{ m s}$	$40 \cdot 10^{6} \text{ V m}^{-1}$
$ ho_{ m v}$	$10^{16}\Omegamm$
'3	2,5

Tab. 2: Elektrické vlastnosti materiálu Nomex

Materiál Nomex je vyráběn v různých tloušťkách a může být buď v kalandrovaném, nebo nekalandrovaném provedení. Pro vysokonapěťové účely je vyráběn s 50 % obsahem slídy. [9]

# 2.1.2 Polyethyléntereftalát

Polyethyléntereftalát patří do skupiny termoplastů, tato skupina se řadí mezi polykondenzáty syntetických plastů.

Nejznámějším lineárním polyesterem je polyethyléntereftalát, který vzniká polykondenzací ethylénglykolu (OH-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-OH) s kyselinou tereftalátovou COOH-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-COOH.

Výroba PET vychází z polykondenzační reakce dimethyltereftalátu (DMT) s ethylénglykolem (EG), při které vzniká polyethyléntereftalát a současně se uvolňuje methanol. Mechanické, ale i transportní vlastnosti (propustnost pro plyny) strmě závisí na polymeračním stupni PET (čili střední molární hmotnosti). Výroba PET probíhá v třístupňové syntéze.

PET může být amorfní nebo semikrystalický (vyšší hustota, pevnost). Semikrystalický je neprůhledný. Obecně se PET vyznačuje vysokou pevností, tuhostí, tvrdostí a odolností proti opotřebení, nízkým koeficientem tření a vynikající rozměrovou přesností, s dobrými elektrickými vlastnostmi. Odolává alkoholům, olejům, alifatickým uhlovodíkům (benzinu) a zředěným kyselinám. Neodolává silným kyselinám a zásadám, chlorovaným uhlovodíkům a benzolu.

Semikrystalický PET se používá na rozměrově přesné elektroizolační součásti - držáky kontaktů, tělesa stykačů, průchodky, cívky.



Obr. 15: Strukturní jednotka polyethylénteraftalátu

# 2.2 Pracoviště pro namáhání a pracoviště pro měření

K tepelnému stárnutí byla použita klimatická komora SteriCell 55. Vzorky do ní byly volně vloženy a byla nastavena požadovaná teplota v komoře.

K elektrickému a kombinovanému stárnutí byla použita tepelná komora SteriCell 111, dvouelektrodový systém, vysokonapěťový zdroj, vyrobený na ústavu elektrotechnologie, a regulovatelný zdroj Diametral AC250K1D. Vzorky určené k elektrickému nebo kombinovanému namáhání byly vkládány do elektrodového systému, který je uveden na obr. 16. Dvouelektrodový systém byl uložen v klimatické komoře SteriCell 111. Celý dvouelektrodový systém sestával z kovového plátu, na kterém byly ze spodu přišroubovány spodní elektrody. Horní elektrody byly mezi sebou pospojovány vodiči, tak, aby vzniklo paralelní spojení kapacit. Vodiče, vedoucí z vysokonapěťového zdroje, byly připojeny na první dvouelektrodový systém tak, že spodní vodič byl připojen ze spodu ke kovovému plátu a spodní elektrodě a horní vodič byl připojen k horní elektrodě. Při elektrickém namáhání byly vzorky vloženy do dvouelektrodových systémů, které byly v komoře uloženy kvůli ochraně před dotykem živých částí. Při kombinovaném namáhání byl postup stejný, jen se v klimatické komoře nastavila požadovaná teplota. Výstupní napětí vysokonapěťového zdroje bylo regulováno pomocí zdroje Diametral.

K měření dielektrických vlastností byl použit přesný RLC - metr Agilent E4980A a tříelektrodový systém HP 16451B. Pro měření dielektrických vlastností v teplotních cyklech byly použity dva tříelektrodové systémy vyrobené na ústavu elektrotechnologie, RLC - metr Agilent E4980A a teplotní komora SteriCell 55.

#### 2.2.1 RLC - metr Agilent E4980A

Přístroj Agilent E4980A je univerzální, přesný RLC metr. Slouží ke zkoušení komponentů, kontrole jakosti a užití v laboratoři. Pracuje v rozsahu kmitočtů 20 Hz – 2 MHz (s přesností  $\pm$  0,01 %), a v rozsahu napětí 0,1 m V<sub>rms</sub> až 2 V<sub>rms</sub>. Agilent E4980A pracuje na principu mostové metody s automatickým vyvažováním.

Přístroj umožňuje C-D měření se základní přesností  $\pm$  0,05 % (C),  $\pm$  0,0005 % (D) při všech kmitočtech se sedmi – digitálním rozlišením (rozlišení ztrátového činitele je 1 ppm) v každém rozsahu.

Se zabudovaným komparátorem, může E4980A na výstupu porovnávat výsledky pro řazení součástí do desítkového zásobníku. Volba rozhraní handler (manažer) nebo scanner (snímač), umožňuje velice snadno v kombinaci s manažerem součástí, snímačem součástí a systémovým kontrolerem plně automatizovat testování součástí, třídění součástí a kontrolu kvality zpracovaných dat.

Ke komunikaci přístroje s PC slouží obslužný program VeePro. Agilent E4980A pracuje na základním rozhraní GP-IB/LAN/USB. Toto rozhraní umožňuje naprogramovat testovací systém a tím automatizovat měření, protože bude nepřerušovaně spouštět testovací systém.

Přístroj je dále vybaven

- sériovým a paralelním ekvivalentním měřicím obvodem
- automatickým a ručním řazením
- vnitřním (INT), vnějším (EXT), ručním (MAN) spouštěním a GPIB spouštěčem (BUS)
- programovatelným zpožděním ze spouštěcího příkazu do začátku měření 0 999s
   s krokem 1 ms
- čtyřmi páry vývodů
- krátkou, střední a dlouhou integrační dobou

G = vodivost

C = kapacita

- testováním délky kabelu, standardně 0 m, 1 m, 2 m a 4 m. [1]

Veličiny, které je možné měřit přístrojem Agilent, je možné rozdělit na primární a sekundární veličiny:

Primární veličiny	Sekundární veličiny	
Z  = absolutní hodnota impedance	RS = sériový odpor	
Y  = absolutní hodnota admitance	RP = paralelní odpor	
L = indukčnost	X = reaktance	
R = odpor	B = susceptance	

D = ztrátový činitel

Q = činitel jakosti $\theta = fázový úhel$ 

Tab. 3: Primární a sekundární veličiny, které umožňuje měřit RLC – metr Agilent E4980A

Odchylku naměřených hodnot lze vypočítat ze vztahů (75), (76). Absolutní odchylka je dána součtem relativní a kalibrační odchylky. Relativní odchylka v sobě obsahuje stabilitu, teplotní součinitel, linearitu, opakovatelnost a kalibrační interpolaci chyby.

Absolutní odchylka

$$A_{\rm a} = A_{\rm e} + A_{\rm cal},\tag{75}$$

kde  $A_e$  je relativní přesnost a  $A_{cal}$  je kalibrační přesnost.

Relativní odchylka

$$A_{\rm e} = \left[ \left( A_{\rm b} + \frac{Z_{\rm s}}{|Z_{\rm m}|} \ 100 \right) + \left( Y_{\rm 0} \ |Z_{\rm m}| \ 100 \right) \right] K_{\rm t},\tag{76}$$

kde  $A_b$  je základní odchylka,  $|Z_m|$  je impedance zjištěná přístrojem,  $Z_s$  je kompenzace SHORT (ztrátová impedance),  $Y_0$  kompenzace OPEN (rozptylová admitance) a  $K_t$  je teplotní součinitel. Impedance zjištěná přístrojem se vypočítá ze vztahu

$$Z_{\rm m} = Z_{\rm s} + \frac{\frac{Z_{\rm v}}{Y_0}}{\frac{1}{Y_0} + Z_{\rm v}},\tag{77}$$

kde  $Z_v$  je skutečná impedance měřeného vzorku. Po úpravách lze pro skutečnou měřenou impedanci použít vztah

$$Z_{\rm v} = \frac{Z_{\rm m} - Z_{\rm s}}{1 - (Z_{\rm m} - Z_{\rm s}) Y_0}.$$
(78)

Při měření kapacity a ztrátového činitele však vznikají také chyby, které jsou způsobeny hlavně délkou kabelu a jeho rozptylovou admitancí. Z toho důvodu je potřeba před každým měřením provést korekce. Pro tyto korekce má Agilent E4980A nainstalovány i funkce pro jejich měření, a to funkce OPEN, SHORT a LOAD.

- Korekce OPEN (měření naprázdno) odstraňuje chybu způsobenou rozptylovou admitancí Y<sub>0</sub>.
- Korekce SHORT (měření nakrátko) odstraňuje chybu způsobenou ztrátovou impedancí  $Z_s$ .
- Korekce LOAD zlepšuje přesnost měření použitím pracovního normálu (kalibrovacího zařízení) jako reference. [1]

# 2.2.2 Dvouelektrodový systém

Používaný elektrodový systém je složen ze dvou elektrod. Elektrody jsou vyrobeny z oceli DIN 1.4301+1X (X5CrNi18-10). Je to ušlechtilá, nerezová a legovaná ocel. Tento materiál byl použit z důvodu dostatečné odolnosti proti korozi. Z této oceli byly vyrobeny celkově 24 elektrody. Rozměry jedné elektrody, včetně závitu uprostřed, jsou znázorněny na obr. 16. Plochy přiléhající na vzorek byly u všech elektrod vyleštěny. Kovový plát, na kterém byly umístěny všechny dvouelektrodové systémy, byl vyroben na ústavu elektrotechnologie a je znázorněn na obr. 17 včetně jeho tloušťky, všech rozměrů a rozměrů vyvrtaných děr pro uchycení elektrod a děr pro proudění vzduchu při ohřívání v klimatické komoře.



Obr. 16: Nákres elektrody [mm]



Obr. 17: Kovový plát pro uchycení všech dvouelektrodových systémů

#### 2.2.3 Tříelektrodový systém

Tříelektrodový měřicí systém slouží pro měření vlastností materiálů, které mají přibližně stejné vnitřní a povrchové odpory. Systém odstraňuje vliv povrchového proudu pomocí speciální ochranné elektrody (stínicí elektrody). Tato elektroda je připojena na nulový potenciál a odvádí povrchový proud. Povrchový proud musí být odveden, protože je podstatně větší než proud procházející objemem materiálu a mohl by tak ovlivňovat měření.

Stínící elektroda u vyrobeného tříelektrodového systému je větší z důvodu zajištění definovaného přítlaku povrchu elektrod k vzorku. Rozměry všech elektrod byly voleny v souladu s originálním tříelektrodovým systémem HP 16451B. Vyrobený tříelektrodový měřicí systém je v řezu znázorněn na obr. 18. Pro experimentální měření byly vyrobeny dva tyto tříelektrodové systémy. Byly použity z důvodu měření kmitočtové závislosti komplexní permitivity při teplotách až 150 °C, protože u tříelektrodového systému HP 16451B uvádí výrobce maximální provozní teplotu 40 °C.



Obr. 18: Řez tříelektrodovým systémem [31]

Pro měření vzorků vystavených elektrickému i kombinovanému namáhání při teplotě okolí, byl použit originální tříelektrodový systém HP 16451B. Jeho řez je znázorněn na obr. 19.



Obr. 19: Řez tříelektrodovým systémem HP 16451B [10]

# 2.2.4 Zdroj Diametral

Procesorem řízený zdroj Diametral AC250K1D slouží k regulaci výstupního napětí vysokonapěťového zdroje. Výstupní napětí lze měnit v rozsahu 0 V až 290 V, při maximálním výstupním proudu 1 A. Výstupním napětím zdroje je transformované napětí ze sítě 230 V/50 Hz. Díky tomu má výstupní napětí čistý sinusový průběh s minimální změnou napětí 1 V. Na čelním panelu zdroje jsou vedle klávesnice i dva displeje. Na horním displeji se zobrazuje nastavená hodnota a na spodním skutečná hodnota výstupního napětí. Zdroj je ovládán pomocí numerické klávesnice nebo pomocí PC. Nastavení požadovaného napětí se provede tak, že na numerické klávesnici se nastaví požadovaná hodnota, která se zobrazí na horním displeji a po zmáčknutí klávesy "enter", zdroj tuto hodnotu nastaví jako výstupní napětí. Přesnost nastavované hodnoty výstupního napětí je 2,5 % z rozsahu. [31]

#### 2.2.5 Vysokonapěťový zdroj

Vysokonapěťový zdroj byl vyroben na ústavu elektrotechnologie. Jeho nejdůležitější součástí je vysokonapěťový transformátor se vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu. Důležité údaje o zdroji:  $U_p = 220 \text{ V}, U_s \approx 2300 \text{ V}$  a příkon 1440 VA. Na sekundárním vinutí jsou připojeny dva děliče, a to kapacitní a odporový dělič.

Kapacitní dělič umožňuje sledování přeskoků a výbojů v dutinkách. Skládá se z deseti keramických kondenzátorů o celkové kapacitě C = 56 pF a odporu o hodnotě 100  $\Omega$ .

Odporový dělič slouží pro sledování velikosti a časového průběhu výstupního napětí. Výstupní napětí děliče se pohybuje v rozsahu 0 V až 2,3 V. Je složen ze dvanácti rezistorů, z nichž každý má odpor 820 k $\Omega$ , a jednoho rezistoru o odporu 10 k $\Omega$ . Odporový dělič byl změřen a byl určen výsledný převodní poměr pro přepočet výstupního napětí:

$$R = \frac{9.95 \cdot 10^3}{9.87 \cdot 10^6} \approx 1:992 \tag{79}$$

To znamená, že hodnota napětí, zobrazená na výstupu odporového děliče, změřená pomocí multimetru, po vynásobení koeficientem 992, udává skutečnou hodnotu výstupního napětí.

Oba děliče se nacházejí na přední straně zdroje a jsou z nich vyvedeny BNC konektory. Na zadní straně zdroje jsou vývody vysokého napětí zdroje, napájecí kabel a ventilátor pro chlazení zdroje. [31]

#### 2.2.6 Klimatické komory SteriCell 55 a 111

K tepelnému a kombinovanému namáhání byly použity komory SteriCell 55 a 111. Tyto komory slouží obecně k rovnoměrnému temperování různých druhů materiálů pomocí horkého vzduchu při nastavitelné teplotě a volitelném časovém režimu. Průběh teploty je řízen mikroprocesorem s digitálním displejem a teplotním čidlem Pt 100.

Pracovní teplota těchto komor je výrobcem udávána od 10 °C nad okolní teplotou. Maximální teplota je 250 °C. Odchylky od pracovní teploty při uzavřené odvětrávací klapce a dveřích jsou prostorově v rozmezí -1 °C až +5 °C a časově -1 °C až +3 °C.

Rozdíl mezi komorami SteriCell 55 a 111 je ve velikosti vnějších i vnitřích rozměrů. Rozměry vnitřních prostorů u SteriCell 55 jsou  $400 \times 390 \times 350$  mm (šířka × hloubka × výška). Kdežto rozměry vnitřních prostorů u SteriCell 111 jsou  $540 \times 390 \times 530$  mm. [3]

# 2.2.7 Modifikované pracoviště pro měření v teplotních cyklech

Pro částečné zautomatizování bylo zmodifikováno stávající měřicí pracoviště pro měření ztrátového činitele a kapacity v teplotních cyklech. Bylo rozhodnuto, že bude přidán jeden tříelektrodový systém, který byl vyroben přesně podle již používaného, viz obr. 18. Z důvodu použití druhého tříelektrodového systému bylo nutné rovněž zmodifikovat i průchodku, kterou vedou vodiče připojené na konektory. Do průchodky byly přidány další dvě měděné trubky a další dva BNC konektory. Kompletní zapojení měřícího pracoviště je zobrazeno na obr. 20.



Obr. 20: Zapojení měřicího pracoviště

Měření na tomto pracovišti bude probíhat tak, že při zahřátí komory na danou teplotu se proměří ztrátový činitel a ztrátová kapacita prvního vzorku. Přepojením vodičů na druhé straně průchodky dojde k připojení druhého tříelektrodového systému, což umožní proměřit druhý vzorek. Přepojení vodičů bude prováděno ručně.

# 2.2.8 Použité PC programy

Pro komunikaci měřicích přístrojů s počítačem byl použit program Agilent VeePro. Tento program umožňuje načtení a přidání libovolného měřicího přístroje. Pomocí schematických bloků a různých prvků tohoto programu, je možné vytvořit si vlastní program pro ovládání měřícího pracoviště. Díky tomu je možné měření alespoň z části automatizovat. Velkou výhodou programu VeePro je jeho možnost propojení například s programem Microsoft Excel. Je tedy možné hodnoty zapisovat rovnou do předem vytvořené šablony v Excelu. Ke zpracování naměřených hodnot tedy posloužil program Microsoft Excel.

Rovněž velkou výhodou programu VeePro je možnost nastavení komunikace s přístrojem přes protokol TCPIP, což umožňuje připojit potřebný přístroj k jakémukoli PC v laboratoři přes síť.

# 2.3 Postup měření

Pro experiment bylo použito celkem 39 vzorků materiálu ISONOM<sup>®</sup> NMN typu 0881 a 0883 o rozměrech 90 x 90 mm. Rozdíl mezi oběma typy je v jejich v tloušťce, typ 0881 má tloušťku 0,36 mm a typ 0883 má 0,29 mm. Vzorky byly rozděleny celkem do třinácti sad, přičemž každá sada obsahuje tři vzorky. Označení vzorků bylo zvoleno podle způsobu

namáhání, kterému byly vystaveny. Samotné měření probíhalo i na vzorcích použitých v předchozích experimentech.

Pro sledování vlivu tepelného namáhání byly použity již stárnuté vzorky z předešlých experimentů. Připraveny byly tři nové vzorky T1, T2, T3 typu 0883 (tedy o tloušťce 0,29 mm), které byly namáhány teplotou 205 °C. Ostatní vzorky byly rozděleny do čtyř sad. První sada obsahuje vzorky 11, 12, J7, druhá sada 13, 14, J8, třetí sada J1, J2, J3 a čtvrtá sada J4, J5, J6. Vzorky byly namáhány teplotami 175 °C, 195 °C, 205 °C a 215 °C viz tab. 4. Teploty namáhání byly voleny s přihlédnutím k platné normě ČSN 60505.

Vliv elektrického namáhání byl zkoumán pro dvě intenzity elektrického pole, a to  $4,2 \cdot 10^6$  V m<sup>-1</sup> (1,55 kV) a 5,6  $\cdot 10^6$  V m<sup>-1</sup> (2 kV), na vzorcích rozdělených opět do čtyř sad. V první sadě jsou vzorky 1, 2, 3 (tloušťka 0,36 mm), v druhé sadě 7, 8, 9 (tloušťka 0,36 mm), ve třetí sadě E1, E2, E3 (tloušťka 0,29 mm) a ve čtvrté sadě E4, E5, E6 (tloušťka 0,29 mm), viz tab. 4. Napětí bylo voleno s ohledem na maximální napětí zdroje.

Kombinované namáhání bylo sledováno na vzorcích C4, C5, C6 (namáhaných teplotou 195 °C s napětím 1,5 kV), C10, C11, C12 (namáhaných teplotou 205 °C s napětím 1,55 kV), C13, C14, C15 (namáhaných teplotou 195 °C s napětím 2 kV) o tloušťce vzorků 0,36 mm a na vzorcích A1, A2, A3 (namáhaných teplotou 205 °C s napětím 1,55 kV) o tloušťce 0,29 mm. Přehled kombinovaně namáhaných vzorků se nachází rovněž v tab. 4.

U kombinovaně stárnutých vzorků, byly proměřovány hodnoty ztrátového činitele a paralelní kapacity v závislosti na teplotě, na pracovišti přímo k tomu postaveném, které je zobrazeno na obr. 20. Základem tohoto pracoviště je klimatická komora SteriCell 55, pomocí které byla nastavována požadovaná teplota. K měření byly použity dva tříelektrodové systémy vyrobené na ústavu elektrotechnologie. Jejich přesný popis a řez jsou znázorněny na obr. 18. Hodnoty  $C_p$  a tg  $\delta$  byly měřeny při teplotách 25 °C, 50 °C, 90 °C, 120 °C a 150 °C.

Parametry, kterými byly vzorky namáhány a jejich doby namáhání jsou uvedeny v tab. 4.

Vzorky	Způsob namáhání	Parametry namáhání	Počet hodin	Tloušťka
T1, T2, T3	tepelné	205 °C	500	0,29 mm
11, 12, J7	tepelné	205 °C	1500	0,36 mm
13, 14, J8	tepelné	215 °C	1000	0,36 mm
J1, J2, J3	tepelné	175 °C	1000	0,36 mm
J4, J5, J6	tepelné	195 °C	1000	0,36 mm
1, 2, 3	elektrické	1,55 kV	300	0,36 mm
E1, E2, E3	elektrické	2 kV	200	0,29 mm
E4, E5, E6	elektrické	1,55 kV	100	0,29 mm
7, 8, 9	elektrické	2 kV	350	0,36 mm
C4, C5, C6	kombinované	1,5 kV/ 195 °C	346	0,36 mm
C10, C11, C12	kombinované	1,55 kV/ 205 °C	280	0,36 mm
C13, C14, C15	kombinované	2kV/ 195 °C	250	0,36 mm
A1, A2, A3	kombinované	1,55 kV/ 205 °C	100	0,29 mm

Tab. 4: Přehled zkušebních vzorků

Využitím RLC - metru Agilent E4980A ve spojení s tříelektrodovým systémem HP 16451B byly na vzorcích měřeny hodnoty ztrátového činitele a kapacity, které byly zapisovány do programu MS Excel. Před každým měřením byly zapnuty korekce OPEN a SHORT, které odstraňují chybu spojenou s délkou přívodního kabelu a jeho vlastností, popsaných v kapitole 2.2.1. Měření probíhalo při teplotě okolí.

Před samotným experimentem byly vzorky vždy předkondiciovány v exsikátoru s nastavenou relativní vlhkostí okolí po dobu minimálně čtyř dnů. V prvním exsikátoru byla nastavena relativní vlhkost na 0 %, použitím syntetických zeolitů. Zeolity jsou krystalické hydratované alumosilikáty alkalických kovů (draslík, dusík, lithium atd.) a alkalických zemin (vápník, radium atd.). Ve druhém exsikátoru byla nastavena relativní vlhkost na 43 %, pomocí nasyceného roztoku soli  $K_2CO_3$  (uhličitanu draselného) v destilované vodě.

# 2.4 Výsledky měření

U všech vzorků byly sledovány hodnoty ztrátového činitele tg $\delta$  a paralelní kapacity  $C_p$  v závislosti na kmitočtu. Parametry byly měřeny přístrojem Agilent E4980A v kmitočtovém rozsahu 20 Hz až 2 MHz. Naměřené veličiny byly zapisovány do programu MS Excel. Každý vzorek byl změřen pětkrát, aby byly odstraněny možné chyby měření. Z výsledných údajů,

pak byla vypočítána relativní permitivita  $\varepsilon'$  a ztrátové číslo  $\varepsilon''$ . Ty byly vyneseny do grafu v závislosti na kmitočtu s parametrem doby stárnutí, nebo teploty. Grafy jsou uváděny v rozsahu  $10^2$  Hz až  $2 \cdot 10^6$  Hz. Všechny naměřené hodnoty a výsledné závislosti pro všechny vzorky jsou uloženy na přiloženém datovém médiu.

K vyhodnocení tepelného stárnutí byly vybrány vzorky 14, J7 a T1. Vzorky byly namáhány teplotou 205 °C a 215 °C po dobu minimálně 500 hodin. Rozdíl mezi vzorky je v jejich tloušťce. Vzorky 14 a J7 mají tloušťku 0,36 mm, kdežto vzorek T1 má tloušťku 0,29 mm. Vzorky byly před každým měřením nejdříve vysušeny v exsikátoru s relativní vlhkostí 0 % po dobu minimálně čtyř dní a před dalším měřením byly exponovány v exsikátoru s relativní vlhkostí 43 % po dobu minimálně čtyř dní.

Elektrické stárnutí je vyhodnoceno na vzorcích 1, 9 a E4. Vzorky byly namáhány napětím 1,55 kV a 2 kV. Rozdíl mezi vzorky je opět v jejich tloušťce – vzorky 1 a 9 mají tloušťku 0,36 mm a vzorek E4 má 0,29 mm. Vzorky byly rovněž měřeny při vysušení a navlhnutí.

Pro vyhodnocení kombinovaného (elektrického a tepelného) namáhání byly použity vzorky A1, C11 a C13. Vzorky byly kombinovaně namáhány teplotou 205 °C s napětím 1,55 kV a 195 °C s 2 kV. Vzorek A1 je opět tenčí, hodnoty tloušťky jsou stejné jako v předchozích případech. Rovněž byly vystaveny dvěma relativním vlhkostem okolí. U kombinovaně stárnutých vzorků byl navíc sledován vliv teploty na kmitočtovou závislost složek komplexní permitivity. Složky komplexní permitivity byly měřeny při teplotách 25 °C, 50 °C, 90 °C, 120 °C a 150 °C.

K porovnání vlivu vlhkosti na zkoumaný materiál byl vybrán vzorek C13. Jak již bylo zmíněno, vzorky byly vkládány do exsikátorů s nastavenou relativní vlhkostí 0 % a 43 % na dobu minimálně čtyř dnů.



**Obr. 21**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  tepelně namáhaného vzorku J7 při teplotě měření 23 °C a teplotě namáhání 205 °C pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).





**Obr. 22**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  tepelně namáhaného vzorku 14 při teplotě měření 23 °C a teplotě namáhání 215 °C pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).







**Obr. 23**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  tepelně namáhaného vzorku T1 při teplotě měření 23 °C a teplotě namáhání 205 °C pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).






**Obr. 24**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  elektricky namáhaného vzorku 1 při teplotě měření 23 °C a napětí 1,55 kV pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).



**Obr. 25**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  elektricky namáhaného vzorku E4 při teplotě měření 23 °C a napětí 1,55 kV pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).



**Obr. 26**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  elektricky namáhaného vzorku 9 při teplotě měření 23 °C a napětí 2 kV pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).







**Obr. 27**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  kombinovaně namáhaného vzorku C11 při teplotě měření 23 °C a při namáhání teplotou 205 °C a napětím 1,55 kV pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).







**Obr. 28**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  kombinovaně namáhaného vzorku A1 při teplotě měření 23 °C a při namáhání teplotou 205 °C a napětím 1,55 kV pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).







**Obr. 29**: Závislosti  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  kombinovaně namáhaného vzorku C13 při teplotě měření 23 °C a při namáhání teplotou 195 °C a napětím 2 kV pro jednotlivé doby stárnutí (relativní vlhkost 0 %).





**Obr. 30**: Změny závislosti  $\varepsilon' = F(f)$  kombinovaně namáhaných vzorků A1 (205 °C, 1,55 kV) a C11 (205 °C, 1,55 kV) vlivem teploty; teploty měření 27 °C, 50 °C, 90 °C, 120 °C a 150 °C; doba stárnutí 100 h.





**Obr. 31**: Změny závislosti  $\varepsilon'' = F(f)$  kombinovaně namáhaných vzorků A1 (205 °C, 1,55 kV) a C11 (205 °C, 1,55 kV) vlivem teploty; teploty měření 27 °C, 50 °C, 90 °C, 120 °C a 150 °C; doba stárnutí 100 h.







**Obr. 32**: Srovnání závislostí  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  při 0 % a 43 % relativní vlhkosti okolí a času stárnutí 100 hodin kombinovaně namáhaného vzorku C13 (200 °C a 2 kV).

## 2.5 Zhodnocení výsledků měření

Všechny naměřené veličiny byly získány metodou dielektrické relaxační spektroskopie (DRS). Z naměřených závislostí  $\varepsilon'' = F(f)$  je patrný výskyt relaxačních maxim ve zkoumaném materiálu, což potvrzuje, že se jedná o dielektrikum relaxačního typu. Vybrány byly příklady tepelného, elektrického a kombinovaného (tepelně elektrického) namáhání a pro srovnání vzorek namáhaný stejnými parametry, ale s jinou tloušťkou.

Tepelné namáhání se projevuje hlavně posunem relaxačního maxima směrem k vyšším kmitočtům, tedy zmenšováním relaxační doby  $\tau_0$ . Fyzikální význam relaxační doby je v rychlosti odezvy na přiložené elektrické pole. Při tepelném namáhání, jak již bylo řečeno, se snižuje  $\tau_0$ , neboli klesá rychlost odezvy natáčejících se dipólů na přiložené elektrické pole. To je však více patrno až z tabulek pro výpočet Havriliak – Negamiho funkce, umístěných na paměťovém médiu, než přímo z grafu. U vzorků tepelně stárnutých 1000 hodin a více je patrné i z grafu, že ztrátové číslo se nijak výrazně nemění. Po stárnutí po dobu 500 hodin je vidět, že ztráty dokonce klesají. To může být způsobeno i tím, že za vysoké teploty dochází zpočátku ještě k částečnému vytvrzení vnitřních vrstev (lepšímu přilnutí vrstev k sobě navzájem) zkoumaného kompozitního materiálu, a tím k mírnému zlepšení elektroizolačních vlastností. Zhoršování těchto vlastností nastává až při expozici kolem 1000 hodin. Vzorky namáhané teplotou 215 °C vykazují v podstatě stejné průběhy kmitočtových závislostí komplexní permitivity, jen ztráty jsou řádově o několik tisícin menší.

Vliv elektrického namáhání se projevuje hlavně zvyšováním ztrátového čísla v závislosti  $\varepsilon'' = F(f)$  a tím tedy narůstáním intenzity relaxace  $\Delta \varepsilon$  ( $\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ ). Fyzikálně je intenzita relaxace úměrná součinu koncentrace dipólů a jejich velikosti. Z naměřených výsledků vyplývá, že po namáhání elektrickým polem, a to při obou zkoušených intenzitách, vzrůstá hlavně koncentrace a velikost dipólů. Intenzita relaxace se zvyšuje s rostoucí dobou namáhání. Výjimkou je průběh funkce  $\varepsilon'' = F(f)$  u vzorku 1, kdy po 200 hodinách stárnutí ztráty (intenzita relaxace) prudce klesnou. Důvodem mohou být strukturální změny v materiálu, avšak k potvrzení takového předpokladu, by bylo zapotřebí, aplikovat některou z metod strukturální analýzy. Různá velikost intenzity elektrické pole použitá k namáhání vzorků se projevila různě velkými ztrátami. Hodnota ztrátového čísla v maximu je větší při namáhání napětím 2 kV. Po 300 hodinách namáhání napětím 2 kV začíná být kmitočtový průběh ztrát netypický. Ztráty jsou nejvyšší při nízkých kmitočtech, pak dochází k jejich

poklesu. To může být způsobeno například částečným průrazem vzorku, a který vede ke zvýšení vodivosti.

Kombinované namáhání použitých vzorků nesplňuje teoretický předpoklad, že ztráty by se měly zvyšovat s přibývající dobou namáhání. Z uvedených grafických závislostí je vidět, že hodnoty ztrátového čísla se zvyšujícím se počtem hodin klesají. Po 100 hodinách namáhání se ztráty mění už jen v řádu několika tisícin. Pravděpodobnou příčinou je strukturální změna materiálu vyvolaná hlavně zvýšenou teplotou. Lze tak usoudit podle toho, že při samotném tepelném namáhání se do 500 hodin ztráty také zmenšují. Jedná se opět pravděpodobně o částečné vytvrzení vnitřních vrstev kompozitního materiálu ISONOM NMN. Pro ověření tohoto tvrzení by však bylo nutné opět použití nějaké strukturní analýzy. U vícefaktorově namáhaných vzorků docházelo k tepelným průrazům, při době namáhání okolo 300 hodin. Jednotlivé průrazy jsou zdokumentovány níže. Je možné předpokládat, že ztráty vyvolané kombinovaným namáháním (tepelným a elektrickým) v použitém materiálu, klesnou na určitou hodnotu, okolo které se už příliš nemění až do doby než dojde k průrazu.

Vzorky byly před každým měřením, buď vysušeny v prostředí s relativní vlhkostí okolí 0 %, nebo navlhnuty v prostředí s relativní vlhkostí 43 %. Navlhnutí se u vzorků projevilo zvýšením ztrátového čísla v maximu a rovněž při nízkých kmitočtech. Zvýšení ztrát v oblasti nízkých kmitočtů může být následkem zvýšení elektrické vodivosti nebo výskytem druhého relaxačního mechanismu, spojeného s mezivrstvovou polarizací. Mezivrstvová polarizace se v tomto případě vyskytuje na rozhraní jednotlivých složek kompozitního materiálu.

Všechny naměřené průběhy byly proloženy Havriliak – Negamiho funkcí, resp. z něj vyjádřenou imaginární složkou ve tvaru

$$\varepsilon'' = \frac{\Delta\varepsilon\sin\beta\,\Phi}{\left[1+2\,(\omega\,\tau_0)^{1-\alpha}\,\sin\frac{\alpha\,\pi}{2}+(\omega\,\tau_0)^{2\,(1-\alpha)}\right]^{\frac{\beta}{2}}},\tag{80}$$

přičemž  $\boldsymbol{\Phi}$  se vypočítá

$$\Phi = \arctan\left(\frac{(\omega \tau_0)^{1-\alpha} \cos\left(\frac{\alpha \pi}{2}\right)}{1+(\omega \tau_0)^{1-\alpha} \sin\left(\frac{\alpha \pi}{2}\right)}\right).$$
(81)

Parametry popisující rozložení Havriliak – Negamiho funkce jsou:  $\Delta \varepsilon$  intenzita relaxace,  $\tau_0$  poloha relaxačního maxima, šířka maxima  $\alpha$  a asymetrie maxima  $\beta$ . Všechny naměřené průběhy byly proloženy touto funkcí a zmíněné parametry pro vybrané vzorky jsou uvedeny v tab. 5. Tabulky s vypočítanými parametry pro všechny ostatní naměřené průběhy jsou uloženy na paměťovém médiu.

Vzorek	Doba stárnutí	Δε[-]	α[-]	αβ[–]	$ au_0[s]$
17	0 h	2,60E-01	8,40E-01	1,10E-01	3,00E-04
	500 h	1,50E-01	7,00E-01	9,20E-02	1,90E-04
J/	1000 h	1,88E-01	6,50E-01	8,80E-02	2,00E-04
	1500 h	1,86E-01	6,50E-01	8,80E-02	1,83E-04
	0 h	2,55E-01	8,20E-01	1,10E-01	3,60E-04
14	500 h	1,50E-01	6,00E-01	9,00E-02	2,10E-04
	1000 h	1,90E-01	6,30E-01	8,00E-02	2,60E-04
T1	0 h	2,30E-01	7,40E-01	1,07E-01	8,00E-04
	500 h	2,05E-01	6,40E-01	9,50E-02	4,00E-04
	0 h	2,54E-01	7,57E-01	1,10E-01	5,42E-04
1	100 h	2,57E-01	7,50E-01	1,15E-01	3,80E-04
1	200 h	2,10E-01	7,90E-01	1,13E-01	1,00E-03
	300 h	2,60E-01	7,30E-01	1,12E-01	2,00E-04
	0 h	2,20E-01	6,80E-01	9,45E-02	5,00E-04
E4	100 h	2,50E-01	6,90E-01	9,45E-02	5,50E-04
	200 h	2,52E-01	6,80E-01	9,06E-02	3,30E-04
	0 h	2,26E-01	7,10E-01	1,23E-01	5,00E-04
	100 h	2,50E-01	7,30E-01	1,02E-01	3,50E-04
9	200 h	2,80E-01	6,70E-01	1,00E-01	1,00E-03
	300 h	nelze	nelze	nelze	nelze
	350 h	nelze	nelze	nelze	nelze
	0 h	2,10E-01	7,15E-01	1,45E-01	3,63E-04
C11	100 h	1,85E-01	7,05E-01	1,09E-01	3,40E-04
	250 h	1,80E-01	6,80E-01	1,23E-01	1,50E-04
	280 h	1,85E-01	7,00E-01	1,00E-01	4,40E-04
A1	0 h	2,30E-01	7,10E-01	8,90E-02	6,41E-04
	30 h	2,11E-01	7,00E-01	1,04E-01	6,00E-04
	100 h	2,00E-01	6,88E-01	9,50E-02	3,50E-04
C13	0 h	2,10E-01	7,20E-01	1,35E-01	4,50E-04
	50 h	2,00E-01	7,70E-01	1,20E-01	5,00E-04
	100 h	1,90E-01	7,30E-01	1,08E-01	2,40E-04

Tab. 5: Parametry Havriliak – Negamiho rozdělení pro vybrané vzorky

Z tab. 5 je vidět, že intenzita relaxace  $\Delta \varepsilon$  se zvyšuje hlavně u elektrického namáhání; u tepelného se v podstatě nemění a u kombinovaného klesá. To souvisí s růstem nebo poklesem ztrátového čísla, jak již bylo uvedeno dříve. Parametr  $\alpha$  charakterizující šířku relaxačního maxima je vysoký hlavně u kombinovaného a elektrického namáhání. Z fyzikálního hlediska tento parametr udává míru vzájemné vazby mezi dipóly resp. jejich kooperativitu. Platí, že pro  $\alpha \rightarrow 1$  se dipóly otáčejí nezávisle jeden na druhém a rozšiřuje se tak relaxační maximum. Z grafických závislostí je rovněž patrné, že relaxační maximum je širší u kombinovaného a elektrického namáhání. Relaxační doba  $\tau_0$  se snižuje u všech namáhání. Zmenšuje se tedy rychlost odezvy natáčejících se dipólů do směru přiloženého elektrického pole, což je známkou stárnutí materiálu.

Porovnání vzorků s různou tloušťkou ukazuje na stejný průběh kmitočtových závislostí, jen s tím rozdílem, že v tenčím materiálu jsou ztráty nižší řadově o několik tisícin, a to jak ve výchozím stavu, tak i po namáhání.

U kombinovaně namáhaných vzorků C6 (namáhaný teplotou 195 °C a napětím 1,5 kV) a C10 (205 °C a 1,55 kV) došlo k tepelnému průrazu, jak je vidět na obr. 33 a obr. 34. Pro tepelný průraz je charakteristický opálený okraj otvoru vzniklého v materiálu.



**Obr. 33**: Tepelný průraz vzorku C6 kombinovaně namáhaného teplotou 195 °C a napětím 1,5 kV po dobu 346 h; zvětšeno 80x



**Obr. 34**: Tepelný průraz vzorku C10 kombinovaně namáhaného teplotou 205 °C a napětím 1,55 kV po dobu 280 h; zvětšeno 80x

K oběma tepelným průrazům došlo v místu okraje elektrody. Na hranách elektrod je intenzita elektrického pole nejvyšší. Z toho vyplývá součinné působení obou faktorů (teploty a elektrického pole), protože k průrazu došlo právě v místech, kde je intenzita elektrického pole nejvyšší. U vzorku C6 došlo k průrazu po 346 hodinách, kdežto u vzorku C10 už po 280 hodinách namáhání. Z toho je jasně patrný vliv hodnoty napětí a teploty na životnost vzorku, protože vzorek C6 byl namáhán nižší teplotou i nižším napětím než vzorek C10 a k průrazu došlo později.

Na povrchu kombinovaně namáhaných vzorků se objevovaly ještě částečné tepelné průrazy, které jsou patrné i z obr. 34. Jedná se o malé tmavé skvrny s opálenými okraji, které jsou viditelné pouze z jedné strany.

Vliv různého namáhání je pozorovatelný i pouhým okem. Při tepelném namáhání změní celý vzorek barvu z původní matně žluté na šedou. Při elektrickém namáhání nedochází ke změně barvy celého vzorku, avšak v místě, kde byly na vzorek přiloženy elektrody, jsou vidět žlutá kola ve tvaru elektrod, která jsou patrnější se zvyšující se intenzitou elektrického pole. U kombinovaně namáhaných vzorků rovněž dochází ke změně barvy na šedou a v místě, kde byly přiloženy elektrody, jsou také zcela patrná žlutá kola.

## 3 Závěr

Diplomová práce se zabývá tepelným, elektrickým a kombinovaným (tepelně elektrickým) namáháním. Zkoumán byl vliv těchto faktorů na izolační materiál ISONOM NMN, který je v současnosti nejvíce používán jako drážková izolace v různých elektrických vysokonapěťových strojích. K vyhodnocení jednotlivých namáhání byla využita metoda dielektrické relaxační spektroskopie (DRS). Tato metoda byla použita hlavně z důvodu jejího nedestruktivního charakteru. Zkoumání degradace a tím určování životnosti izolačního materiálu je jednou z nejdůležitějších součástí návrhu elektrických zařízení.

V rámci experimentu byly měřeny závislosti ztrátového činitele tg  $\delta$  a paralelní kapacity  $C_p$ na kmitočtu, ze kterých byly vypočítány hodnoty relativní permitivity  $\varepsilon'$  a ztrátového čísla  $\varepsilon''$ . Veličiny byly snímány RLC - metrem Agilent E4980A v rozsahu 20 Hz až 2 MHz. Kmitočtové závislosti byly prošetřeny pro všechny vzorky, všechny druhy namáhání a doby stárnutí a jsou uloženy na přiloženém paměťovém médiu.

Nejdůležitějšími poznatky experimentu jsou tyto skutečnosti: Elektrické namáhání způsobuje zvyšování dielektrických ztrát, především jejich vodivostní složky v průběhu  $\varepsilon'' = F(f)$ . Při kombinovaném namáhání dochází naopak ke snižování dielektrických ztrát, a také k průrazům zkoumaného materiálu. Kombinované a elektrické namáhání způsobuje rozšiřování relaxačního maxima a dochází tak k většímu rozptylu relaxačních dob. Tepelné namáhání způsobuje jen nepatrné změny ztrát, ale dochází k posunu relaxačních dob směrem k vyšším kmitočtům. Vyšší relativní vlhkost způsobuje rovněž nárůst ztrátového čísla a zvýšení vodivostní složky dielektrických ztrát.

Přínos této práce je možno vidět v kompletním návrhu a sestavení pracoviště pro tepelné, elektrické a kombinované namáhání. Rovněž bylo zapotřebí modifikovat pracoviště pro měření v teplotních cyklech tak, aby měření bylo alespoň částečně zautomatizováno z důvodu časové náročnosti experimentální činnosti.

Pro ověření teoretických předpokladů průběhu degradace materiálů při tepelném, elektrickém a kombinovaném namáhání by bylo zapotřebí rozsáhlejšího experimentu s delšími časy namáhání a využití některé z metod strukturální analýzy, ke sledování změn struktury materiálu při namáhání. Rovněž by mohl být na naměřená data aplikován některý z výše uvedených životnostních modelů pro kombinované namáhání.

## 4 Použitá literatura

- [1] AGILENT TECHNOLOGIES. Santa Clara CA95051, United States of America. *E4980A Precision LCR meter – Operation manual*, [cit. 2009-08-04].
- [2] AMIN, S.; AMIN, M.; SUNDRARAJAN, R. Comparative Multi Stress Aging of Thermoplastic Elastomeric and Silicone Rubber Insulators in Pakistan. IEEE. 2008
   Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, s. 293 - 296
- [3] BMT MEDICAL TECHNOLOGY. Brno. Česká republika. *SteriCell 22, 55, 111, 222, 404 Návod k použití* [cit. 2010-14-10].
- [4] CYGAN, P; LAGHARI, J.R. *Models for insulation aging under electrical and thermal multistress*. IEEE, October 1990, vol.25, no.5, s. 923 932.
- [5] Norma ČSN EN 60505. *Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů*. 2005.
- [6] DIAS, C. J., *Determination of a distribution of relaxation frequencies using a combination of time and frequency dielectric spectroscopies:* Universidade Nova de Lisboa, Portugal 1997
- [7] FARAHANI, M., BORSI, H., GOCKENBACH, E., *Dielectric spectroscopy in time and frequency domain on insulation system of high voltage rotating machines:* Institute of Electric Power systems, University of Hannover 2004.
- [8] ISOVOLTA ELEKTROISOLIERSTOFFE. Wiener Neudorf, Austria. *Isonom NMN technical datasheet*, [cit. 2009-26-02].
- [9] ISOVOLTA ELEKTROISOLIERSTOFFE. Wiener Neudorf, Austria. *Nomex technical datasheet*, [cit. 2009-26-02].
- [10] JEŘÁBEK, M., Analýza vícefaktorového namáhání elektroizolačních materiálů. Diplomová práce, FEKT VUT, Brno 2009.
- [11] KAZELLE, J., a spol. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.
- [12] KUČERA, M., Účinky vícefaktorového namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů. Bakalářská práce, FEKT VUT, Brno 2009.

- [13] LIEDERMANN, K., POLSTEROVÁ, H., ROZSÍVALOVÁ, Z., *Klimatotechnologie:* Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.
- [14] LIEDERMANN, K., STRÁNÍK, R., Změny dielektrického spektra glycerolu při dlouhodobé expozici při nízkých teplotách: Ústav Fyziky, Vysoké učení technické v Brně.
- [15] MARTÍNEK, P.; LAURENC, J. *Měření částečných výbojů pomocí digitálního měřicího systému*. ElectroScope. 1. 3. 2007, č.0, s. 1-4. ISSN 1802–4564.
- [16] MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; POLANSKÝ, R.; PROSR, P.; TRNKA, P. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 430 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [17] MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN technická literatura, 2006, 1. vydání, 240 s. ISBN 80-7300-189-6
- [18] MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; TRNKA, P.; TÁBOŘÍK, O. Sledování změn výbojové činnosti namáhaných variant izolačního systému. Sborník Diagnostika 07. 2007, s. 54 - 57.
- [19] MONTANARI,G.C., MAZZANI, G., SIMONI, L., *Progress in Electrothermal Life Modeling of Eleckical Insulation during the Last Decades:* Department of Electrical Engeneering, University of Bologna 2002, Italy
- [20] PELSTER, R. Dielectric relaxation spectroscopy in polymers: broadband ACspectroscopy and its compatibility with TSDC. IEEE. 1999, 10 th International Symposium on Electrets, s. 437 - 444.
- [21] PIHERA, J.; MARTÍNEK, P.; TRNKA, P.; NETOLICKÝ, P. Analýza signálu pulzů částečných výbojů. ElectroScope. 2008, č.2, s. 1-6. ISSN 1802–4564.
- [22] ROZSÍVALOVÁ, Z., JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., SEDLAŘÍKOVÁ, M. *Materiály a technická dokumentace: část materiály v elektrotechnice*. Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.
- [23] SEIFERT, J. M., KÄRNER, H. C., Dielectric diagnostic of moisture induced degradation processes in mineral reinforced high-voltage composite insulation: Institute for High-Voltage Technology and Electrical Power Apparatus, Technische Universität Braunschweig 1996.
- [24] SIMONI, L. A general phenomenological life model for insulating materials under combined stresses. IEEE, April 1999, vol. 6, no. 2, s. 250 257.

- [25] SUNDRARAJAN, R.; CHAPMAN, R.; NOWLIN, R. *Realistic Multistress Long Term Aging of 28kV Polymeric Insulators*. IEEE. 2009 Third International Conference on Power Systems, Kharagpur, INDIA December 27-29, s. 1 6.
- [26] TRNKA, P., *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů:* Katedra technologií a měření, ZČU v Plzni, Plzeň 2006.
- [27] TRNKA, P. Zbytková životnost elektroizolačních systémů. Elektrorevue.4.9.2009, no.22, s. 1-7. ISSN 1213-1539.
- [28] TRNKA, P.; PIHERA, J.; ŠIRŮČEK, M. *Elektrické stromečky fenomén v elektroizolačních materiálech*. Ročenka Elektro. 2010, č.1, s. 18 22.
- [29] TRNKA, P.; HAMAR, R.; MENTLÍK, V. Vliv tvaru napetových impulzu na rychlost stárnutí elektrické izolace. ElectroScope. 2009, č.2, s. 1-4. ISSN 1802–4564.
- [30] VENKATESULU, B.; THOMAS, M. J.; RAICHUR, A. M. Accelerated Multistress Aging of Outdoor Polymeric Insulators. IEEE. 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, s. 67-70.
- [31] VOJTEK, V.: Studium vlivu vícefaktorového namáhání na dielektrická spektra izolačních materiálů. Diplomová práce, FEKT VUT, Brno 2008.

## Seznam symbolů a zkratek

= 0

Ip	$[A m^{-1}]$	proud tekoucí po povrchu izolantu
$i_{\rm pol}$	[A]	polarizační (nabíjecí) proud
$i_{\rm depol}$	[A]	depolarizační (vybíjecí) proud
j	[-]	imaginární jednotka
k	[J K <sup>-1</sup> ]	Boltzmannova konstanta
k,n	[-]	konstanty určené empiricky
L	[h]	doba života izolace
$L_0$	[-]	doba života bez účinků namáhání
т	[kg]	hmotnost
$m_0$	[kg]	hmotnost dokonale vysušené látky
$m^*$	[kg]	hmotnost navlhlé látky
n	[m <sup>-3</sup> ]	koncentrace nosičů elektrického náboje
Р	[C m <sup>-2</sup> ]	vektor polarizace
$P_z$	[W]	ztrátový výkon
q	[C]	elementární elektrický náboj
R	[s <sup>-1</sup> ]	rychlost degradace
S	[-]	namáhání obecně
$S_{t}$	[-]	prahová hodnota obecného namáhání
t	[h]	doba života
t <sub>s</sub>	[h]	doba do selhání při elektrickém namáhání
t <sub>c</sub>	[s]	časový úsek po odstranění $U_{\rm c}$
Т	[K]	absolutní teplota
Т	[K]	tepelné namáhání
$T_{t_0}$	[K]	prahová hodnota tepelného namáhání $T$ pro $E =$

tg $\delta$	[-]	ztrátový činitel
U	[V]	napětí
$U_{ m c}$	[V]	krokové napětí
W	[J]	vazební energie
Wa	[J]	aktivační energie procesu
$\Delta W_{\rm a}$	[J]	volná aktivační energie
$\Delta W_{a_0}$	[J]	volná aktivační energie pro střídavé elektrické pole
$Y_0$	[Ω]	parazitní admitance
Ζ	[Ω]	impedance
Zm	[Ω]	měřená impedance
$Z_{\rm s}$	[Ω]	sériová impedance
$Z_{\rm v}$	[Ω]	výsledná impedance
α	[-]	distribuční parametr určující šířku relaxačního maxima
β	[-]	distribuční parametr určující asymetrii relaxačního maxima
δ	[°]	ztrátový úhel
$\Delta \varepsilon$	[-]	intenzita relaxace
8*	[-]	komplexní permitivita
arepsilon'	[-]	relativní permitivita
$\varepsilon^{\prime\prime}$	[-]	ztrátové číslo
Es	[-]	statická permitivita
$\mathcal{E}_{\infty}$	[-]	optická permitivita
χ	[-]	dielektrická susceptibilita
ψ	[%]	vlhkost
$\psi_{\rm max}$	[%]	maximální vlhkost

$\varphi$	[%]	relativní vlhkost
λ	[m]	je vzdálenost mezi dvěma stavy – pro daný fyzikální děj
μ	$[m^2 V^{-1} s^{-1}]$	driftová pohyblivost
$\mu_{\mathrm{i}}$	[C m]	indukovaný dipólový moment
$\gamma_{\rm v}$	[S m <sup>-1</sup> ]	vnitřní konduktivita
$\gamma_{ m p}$	[S m <sup>-1</sup> ]	povrchová konduktivita
θ	[°C]	teplota
$\vartheta_T$	[°C]	teplota stárnutí
υ	[°C]	trvalá teplota stárnutí
$ ho_v$	[Ω m]	vnitřní rezistivita
$ ho_{ m p}$	[Ω]	povrchová rezistivita
τ	[8]	relaxační doba
$ au_{ m s}$	[8]	střední doba přechodu
ω	$[rad s^{-1}]$	kruhový kmitočet
$\omega_{\rm m}$	$[rad s^{-1}]$	maximální kruhový kmitočet
NMN		nomex-pelyester-nomex
PET		polyethylénteraftalát
DRS		dielektrická relaxační spektroskopie