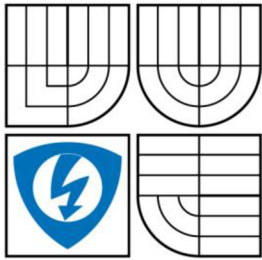


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTROTECHNOLOGY

STUDIUM ELEKTRICKÉHO NAMÁHÁNÍ DRÁŽKOVÉ IZOLACE

STUDY OF ELECTRICAL AGEING SLOT INSULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LADISLAV JABŮREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN FRK, PH.D.

BRNO 2009

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou elektrickým namáháním dielektrických materiálů. Hlavním zaměřením práce je studium působení střídavého elektrického pole velké intenzity na drážkovou izolaci Nomex-Kapton-Nomex. Měření dielektrických ztrát v daném materiálu je prováděno metodou dielektrické relaxační spektroskopie v kmitočtové oblasti. Dalším cílem práce je obeznámit s elektrické stárnutí, jeho příčiny a důsledky na vlastnosti materiálu. Dále se práce zabývá dielektrickou relaxační spektroskopií v časové a kmitočtové oblasti, základními jevy v dielektriku a měřeními veličin spojené s elektrickým stárnutím.

Abstract

This bachelor works deals with electrical effort problems of dielectric materials. The general aim is study of impact alternating electric field of great effort on slot insulation Nomex-Kapton-Nomex. Measurement of loss is realised by dielectric relaxation spectroscopy in frequency domain method. The another aim is apprise of electrical aeging, its causes and incidence on materials. Works deals below dielectric relaxation spectroscopy in time domain and frequency domain, fundamental effect in dielectric and measurement values coherent with electrical aeging.

Klíčová slova

Elektrické namáhání, elektrický výboj, drážková izolace, Nomex-Kapton-Nomex, dielektrická relaxační spektroskopie, dielektrikum, dielektrické ztráty.

Keywords

Electrical effort, electrical charges, slot insulation, Nomex-Kapton-Nomex, dielectric relaxation spectroscopy, dielectric, dielectric loss.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 2.6.2009

.....
Podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Martinu Frkovi, PhD za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů, za poskytnutou metodickou pomoc a odborné rady.

V Brně dne 2.6.2009

.....
Podpis autora

Obsah

ÚVOD.....	8
1 DIELEKTRIKA A IZOLANTY.....	9
1.1 ZÁKLADNÍ ELEKTRICKÉ VELIČINY	9
1.1.1 Relativní permitivita	9
1.1.2 Vnitřní rezistivita a povrchová rezistivita	9
1.1.3 Elektrická pevnost	10
1.2 DIELEKTRICKÁ POLARIZACE.....	10
1.3 ELEKTRICKÁ VODIVOST PEVNÝCH IZOLANTŮ.....	10
1.4 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY A ZTRÁTOVÝ ČINITEL	11
1.4.1 Obecný popis ztrát.....	11
1.4.2 Dielektrické ztráty v pevných izolantech	12
1.5 ELEKTRICKÝ VÝBOJ	14
1.6 DIELEKTRIKUM VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI	15
1.6.1 Debyeovy rovnice	15
1.6.2 Cole-Coleova rovnice	16
1.6.3 Cole-Davidsonova rovnice.....	17
1.6.4 Havriliak-Negami rovnice.....	18
1.7 METODA DIELEKTRICKÉ RELAXAČNÍ SPEKTROSKOPIE VE STŘÍDAVÉM POLI.....	18
2 ELEKTRICKÉ STÁRNUTÍ	20
2.1 ELEKTRICKÉ A VODNÍ STROMEČKY	20
2.2 MODELY ELEKTRICKÉHO STÁRNUTÍ	21
3 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	23
3.1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU.....	23
3.1.1 Voltampérová metoda	23
3.1.2 Můstková metoda	23
3.1.3 Zapojení elektrodového systému.....	24
3.2 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO Činitele A PERMITIVITY	25

3.2.1	Metoda Scheringova můstku	25
3.2.2	Metoda čtyřkapacitního můstku	26
4	DRÁŽKOVÁ IZOLACE	27
4.1	NOMEX	27
4.2	KAPTON	27
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
5.1	POPIS EXPERIMENTU	28
5.2	POSTUP MĚŘENÍ	28
5.3	GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	29
5.4	POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE A PŘÍSLUŠENSTVÍ	34
5.5	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	34
6	ZÁVĚR	36
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37

Seznam obrázků

Obr. 1	Schematické zapojení a) paralelní a b) sériový náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem, převzato z [3].....	12
Obr. 2	Závislost ztrátového činitele nepolárního dielektrika na a) teplotě a b) kmitočtu, převzato z [7].....	13
Obr. 3	Závislost ztrátového činitele polárního dielektrika na a) teplotě a b) kmitočtu, převzato z [7].....	14
Obr. 4	Cole-Cole diagram, převzato z [3].....	16
Obr. 5	Davidsonův-Coleův diagram s jedním distribučním parametrem, převzato z [3].....	18
Obr. 6	Havriliak-Negamiho diagram s dvěma distribučními parametry, převzato z [3].....	18
Obr. 7	Závislost relativní permitivity a ztrátového čísla na úhlovém kmitočtu, převzato z [8].....	19
Obr. 8	Životnost materiálu při střídavém napětí 50 Hz a pulzním napětí 10 kHz dle exponenciálního modelu, převzato z [2].....	21
Obr. 9	Životnost materiálu při střídavém napětí 50 Hz a pulzním napětí 10 kHz dle mocninného modelu, převzato z [2].....	22
Obr. 10	Schéma zapojení voltampérové metody, převzato z [1].....	23
Obr. 11	Schéma zapojení můstkové metody, převzato z [1].....	24
Obr. 12	Schéma zapojení pro měření vnitřního a povrchového odporu, převzato z [7].....	24
Obr. 13	Scheringův vysokonapěťový můstek, převzato z [2].....	25
Obr. 14	Scheringův čtyřkapacitní můstek, převzato z [2].....	26
Obr. 15	Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %).....	29
Obr. 16	Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %).....	29
Obr. 17	Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %).....	30

Obr. 18	Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)	30
Obr. 19	Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)	31
Obr. 20	Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)	31
Obr. 21	Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)	32
Obr. 22	Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)	32
Obr. 23	Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)	33
Obr. 24	Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)	33
Obr. 25	Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)	34
Obr. 26	Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)	34

Úvod

Drážková izolace NKN se používá jako přídatná izolace mezi stěnami vinutí elektrických strojů. Působení vlivu elektrického pole na drážkovou izolaci má důležitý podíl na celkovém stárnutí daného materiálu.

První část bakalářské práce se zabývá charakteristikou dielektrických materiálů, polarizačními mechanismy, dielektrickými ztrátami, popisem chování dielektrika ve střídavém elektrickém poli a metodami měření dielektrických ztrát, zejména metodou dielektrické relaxační spektroskopie. Dále se zabývá elektrickým stárnutím, jeho modely, elektrickým a vodním stromečkům. V neposlední řadě se zabývá měřením elektrickým veličin izolačních materiálů, jako je odpor, ztrátový činitel a jiné.

Druhá část se zabývá experimentálním studiem vlivu střídavého elektrického pole o vyšších intenzitách na drážkovou izolaci NKN. Pro vyšetření vlastností drážkové izolace se použije dielektrická relaxační spektroskopie v kmitočtové oblasti.

1 Dielektrika a izolanty

Dielektrikum je látka, která po vložení do elektrického pole je schopna se polarizovat. Elektrický izolant je naproti tomu materiál, který zabraňuje průchodu proudu mezi dvěma místy s rozdílným potenciálem. Neobsahuje volné částice s elektrickým nábojem, nebo je obsahuje v zanedbatelném množství. Každý izolant je současně dielektrikem, avšak všechna dielektrika nejsou izolanty. K dielektrikům se řadí i látky s vlastnostmi polovodičů.

1.1 Základní elektrické veličiny

Mezi základní elektrické veličiny v dielektriku jsou permitivita (relativní ϵ' a komplexní permitivita $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$), vnitřní rezistivita ρ_v , povrchová rezistivita ρ_p , ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ a elektrická pevnost E_p .

1.1.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita je bezrozměrná veličina, která závisí na materiálu. Relativní permitivitu bychom mohli vypočítat jako podíl absolutní permitivity a permitivity vakua

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}. \quad (1)$$

Relativní permitivita vyjadřuje též, kolikrát se elektrická síla zmenší v případě, že tělesa s elektrickým nábojem jsou místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí.

1.1.2 Vnitřní rezistivita a povrchová rezistivita

Kvalita a stav izolačního materiálu jsou charakterizovány též hodnotou vnitřní rezistivity ρ_v a povrchové rezistivity ρ_p .

Vnitřní rezistivita materiálu je rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř izolantu. Číselně se rovná vnitřnímu odporu krychle ze zkoušeného materiálu o hraně 1 m, měřenému mezi dvěma elektrodami, přiloženými na protilehlých stěnách.

Povrchová rezistivita materiálu se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu izolantu. Číselně se rovná odporu čtverce povrchu zkoušeného materiálu o straně 1 m, měřenému mezi dvěma elektrodami přiloženými na protilehlých stranách.

1.1.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost E_p vyjadřuje napětí způsobující průraz izolace vztažené na tloušťku izolantu.

Velikost polarizace izolantu je závislá na velikosti intenzity elektrického pole. Při překročení určité meze, kdy jsou síly, které působí na nabitě částice atomu, větší než síly, které tyto částice udržují v hranici atomu, se izolant přiloženým napětím poruší, dojde k průrazu. Izolant se stane vodivým a vede elektrický proud. Při elektrickém průrazu se překročí elektrická pevnost izolantu. Elektrická pevnost není konstantní, ale závisí na teplotě, tloušťce dielektrika, vlhkosti, tvarů elektrod a dalších činitelích

1.2 Dielektrická polarizace

Vložení dielektrika do elektrického pole nastává jev, který se nazývá polarizace. Při polarizaci se z atomů nebo molekul dielektrika (nepolární dielektrikum) působením přitažlivé a odpudivé elektrické síly stanou elektrické dipóly – dojde k nesymetrickému rozložení částic s elektrickým nábojem uvnitř atomů nebo molekul. Některé látky (polární dielektrika) obsahují elektrické dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole.

Při působení elektrického pole polarizace dělíme podle druhu nosičů, které se na polarizaci podílejí. Jedná se o polarizace vyvolané posunutím silně nebo slabě vázaných, nebo volných nosičů elektrického náboje. Podílejí-li se na polarizaci silně vázané náboje, jedná se o deformační pružné polarizace. Pokud se podílejí na polarizaci slabě vázané náboje, pak se takové polarizace nazývá relaxační. Kromě silně a slabě vázaných nosičů nábojů se na polarizačních jevech mohou podílet i volné nosiče elektrického náboje. Pak se dané polarizace nazývá migrační polarizace.

1.3 Elektrická vodivost pevných izolantů

Elektrická vodivost spočívá v pohybu volných nebo slabě vázaných elektrických nábojů v elektrickém poli. Elektrická vodivost závisí na druhu nosičů elektrického náboje a jejich koncentraci.

Elektrická vodivost může být, iontová (ionty příměsí, nečistot; ionty vlastní látky), elektronová (v elektrických polích o velmi vysoké intenzitě), elektroforetická (koloidní částice v kapalných látkách), a vnitřní a povrchová.

Vzhledem k zaměření této práce, která pojednává o elektrickém namáhání tuhých drážkových izolací, je soustředěna pozornost jen na elektrickou vodivost tuhých izolantů. V pevných izolantech se může vyskytovat jak elektronová, tak i iontová elektrická vodivost. Za normálních provozních podmínek, při hodnotě intenzity $10^1 \div 10^2 \text{ kV mm}^{-1}$, se uplatní iontová elektrická vodivost.

Pro popis pohyblivosti iontů, který byl odvozen na základě modelu dvojité potenciální jámy, použijeme vztah

$$\mu = \frac{f_0 q l^2}{6kT} e^{-\frac{W}{kT}} \quad (2)$$

a následně dosadíme do obecného vztahu pro konduktivitu

$$\gamma = nq\mu. \quad (3)$$

Pro další úvahy o elektrické vodivosti se pevné látky rozdělují na iontové krystalické látky, anorganické amorfnní látky, organické amorfnní látky.

1.4 Dielektrické ztráty a ztrátový činitel

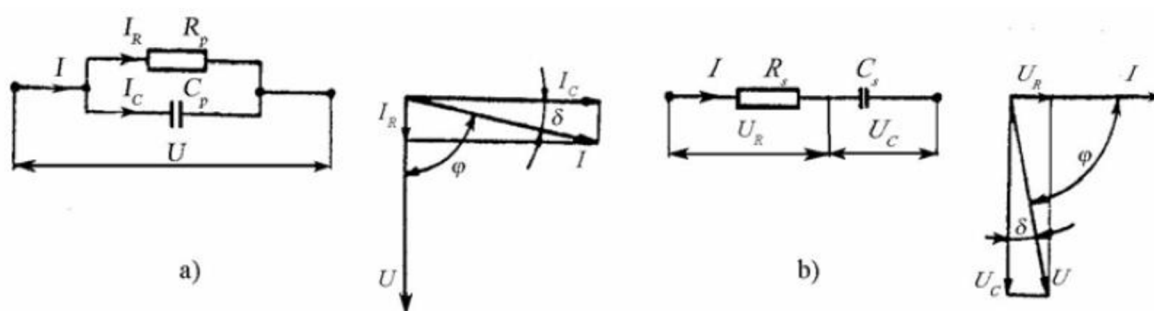
1.4.1 Obecný popis ztrát

Ztráty v dielektriku představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce při jeho vložení do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení stejnosměrného i střídavého pole, jsou provázeny ohřevem dielektrika a jsou příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem.

Mechanismus vzniku ztrát závisí na mnoha faktorech – druhu, struktuře, vlastnostech, obsahu nečistot a příměsí, na vnitřní stavbě a skupenství dielektrika. Příčinou dielektrických ztrát jsou pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje v materiálu.

Celkové ztráty dielektrik jsou součtem vodivostních, polarizačních a ionizačních ztrát. Vodivostní ztráty se vyskytují u všech dielektrik. Závisí na vnitřní a vnější povrchové vodivosti. Jejich podstatou jsou srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky. Polarizační ztráty jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. Velikost těchto ztrát a jejich teplotní a kmitočtové závislosti vycházejí z druhu vyskytujících se polarizací. Ionizační se vyskytují u plynů, a taky u tuhých a kapalných dielektrik, které obsahují plynové vměstky. Podmínkou vzniku ztrát je překročení prahu ionizace daného plynu.

Při určení dielektrických ztrát, vycházíme ze skutečnosti, že si lze každé dielektrikum představit jako paralelní či sériové zapojení dvou ideálních elektrických prvků – odporu a kondenzátoru. Uvedeným způsobem vzniknou tak zvané sériové a paralelní náhradní schémata (Obr. 1), pro něž platí vztahy pro $\text{tg}\delta$ a ztracený výkon P_z . Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ je jedním ze způsobů jak vyjádřit ztráty v dielektriku.



Obr. 1 Schematické zapojení a) paralelní a b) sériový náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem, převzato z [3]

a) Paralelní zapojení

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (4)$$

$$P_z = U^2 \omega C_p \text{tg}\delta \quad (5)$$

b) Sériové zapojení

$$\text{tg}\delta = R_s C_s \quad (6)$$

$$P_z = U^2 \omega C_s \frac{\text{tg}\delta}{1 + \text{tg}^2 \delta} \quad (7)$$

Činitele ovlivňující velikost $\text{tg}\delta$ jsou u všech dielektrik teplota a kmitočet elektrického pole, a u feroelektrik a v případě ionizačních ztrát je to intenzita elektrického pole

1.4.2 Dielektrické ztráty v pevných izolantech

V pevných izolantech se obecně mohou vyskytovat ztráty jak vodivostní, tak i polarizační a ionizační.

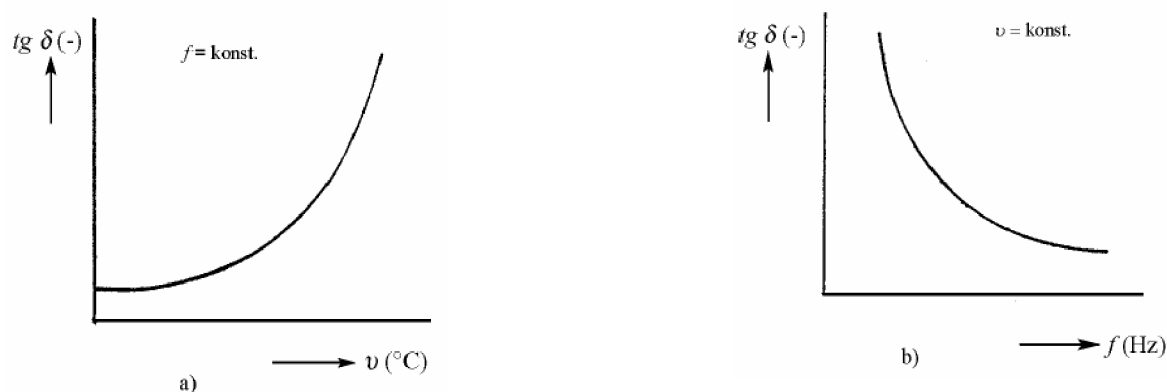
V nepolárních pevných látkách se prakticky uplatňují pouze ztráty vodivostní. Důvodem je, že se v nich vyskytují pouze pružné bezeztrátové polarizace. Dielektrické ztráty jsou v těchto látkách velice malé.

Dielektrické ztráty v iontových izolantech závisí na těsnosti uložení částic. V iontových izolantech s těsným uložení iontů se vyskytují pružné bezeztrátové polarizace. Iontová tepelná relaxační polarizace se vyskytuje jen nepatrně a její vliv lze zanedbat. Ve střídavém elektrickém poli se tyto látky chovají téměř jako látky nepolární. Dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli jsou vodivostního charakteru.

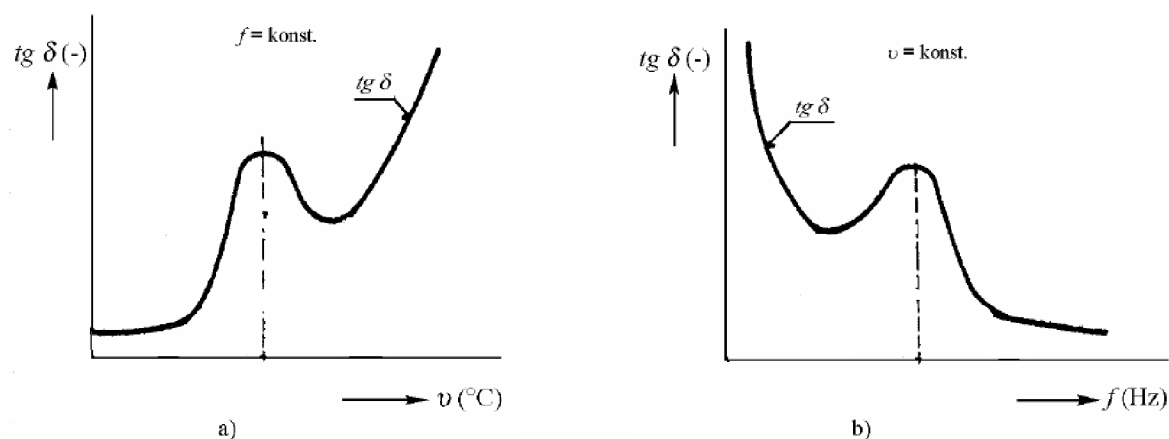
V iontových izolantech s netěsným uložení iontů se výrazně uplatňuje kromě pružných polarizací i iontová relaxační polarizace. V těchto materiálech se vyskytují ztráty jak vodivostní, tak i polarizační.

Iontově amorfnní látky mají taktěž vodivostní i polarizační ztráty. Podle chemického složení, povahy nečistot a podle poruch vnitřní stavby může být v různých látkách různý poměr velikostí jednotlivých složek ztrát. To má za následek různé tvary teplotních a frekvenčních charakteristik dielektrických ztrát.

V polárních pevných izolantech se výrazně projevuje ztrátová dipólová polarizace a dielektrické ztráty mají tak obě složky – vodivostní a polarizační. Občas mohou vznikat i ionizační ztráty v dutinkách.



Obr. 2 Závislost ztrátového činitele nepolárního dielektrika na a) teplotě a b) kmitočtu, převzato z [7]



Obr. 3 Závislost ztrátového činitele polárního dielektrika na a) teplotě a b) kmitočtu, převzato z [7]

1.5 Elektrický výboj

Výbojem se označuje náhlý jev, spojený se vznikem dokonale vodivé cesty ve struktuře izolantů. Obvykle je způsoben vlivem elektrického pole.

Podle skupenského stavu se rozlišují výboje na průraz, který se vyskytuje u tuhých látek, a přeskok, který se vyskytuje u kapalných a plynných izolantů.

Oba jevy jsou spojeny s poklesem napětí a se vzrůstem proudu. U tuhých izolantů je důsledkem trvalé zhoršení elektroizolačních vlastností, u plynných a kapalných jde zpravidla o zhoršení dočasné

Charakter průrazu může být:

- a) Čistě elektrický (elektronický) průraz - podmíněn nárazovou ionizací, která v silných elektrických polích vede k vytvoření lavinovitému nárůstu nosičů elektrického náboje a k následnému porušení krystalické mřížky izolantu.
- b) Tepelný průraz - podmíněn působením tepla vzniklého v izolantu účinkem vnějšího elektrického pole a následným postupným růstem volných nosičů elektrického náboje.

Dále se můžou výboje podle různých kritérií dělit na výboje: nesamostatný, samostatný, vysokotlaký, nízkotlaký, ustálený, neustálený, úplný, částečný.

1.6 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

Dielektrikum vložené do střídavého pole, se chová jinak než v poli stejnosměrném. Při matematickém popisu jednotlivých dějů se musí brát v úvahu kinetické vlastnosti částic. Setrvačnost těchto částic je právě příčinou fázového zpoždění vektoru elektrické indukce $\vec{D}(t)$ za vektorem intenzity elektrického pole $\vec{E}(t)$ o úhel δ . Na základě přiřazení

$$\vec{D}(t) \rightarrow \vec{D}_m e^{j(\omega t - \delta)}, \quad (8)$$

$$\vec{E}(t) \rightarrow \vec{E}_m e^{j\omega t}, \quad (9)$$

lze vztah mezi vektorem elektrické indukce a vektorem středního makroskopického pole zapsat ve tvaru

$$\vec{D}_m e^{j(\omega t - \delta)} = \varepsilon_0 \varepsilon^*(j\omega) \vec{E}_m e^{j\omega t}, \quad (10)$$

odtud pak vyplyne vztah

$$\vec{D}_m e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \varepsilon^*(j\omega) \vec{E}_m. \quad (11)$$

V případě střídavých polí se zavádí frekvenčně závislá komplexní permitivita $\varepsilon^*(j\omega)$ vyjádřená vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega). \quad (12)$$

Reálná složná komplexní permitivity je vlastní relativní permitivita, která je mírou kapacitního charakteru dielektrika. Imaginární se nazývá ztrátovým číslem a je mírou ztrát vzniklých v dielektriku.

U nepolárních dielektrik nemá komplexní permitivita imaginární část a její reálná část není frekvenčně závislá. U polárních dielektrik dochází k tomu, že polarizační děje nemohou sledovat rychlé změny elektrického pole okamžitě, ale se zpožděním. Jde o takzvanou dielektrickou relaxaci.

1.6.1 Debyeovy rovnice

Pro frekvenční závislost komplexní permitivity slabě polárního kapalného dielektrika Debye odvodil rovnici ve tvaru

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (13)$$

kde τ je relaxační doba, která je závislá na teplotě. Pokud se rozloží pravá strana Debyeovy rovnice na reálnou a imaginární pak se dostane

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (14)$$

Imaginární část komplexní permitivity charakterizuje ztráty v dielektriku při jeho namáháním střídavým polem. Podíl imaginární části a reálné části vyjadřuje dielektrické ztráty a nazývá se ztrátovým činitelem $\text{tg} \delta$.

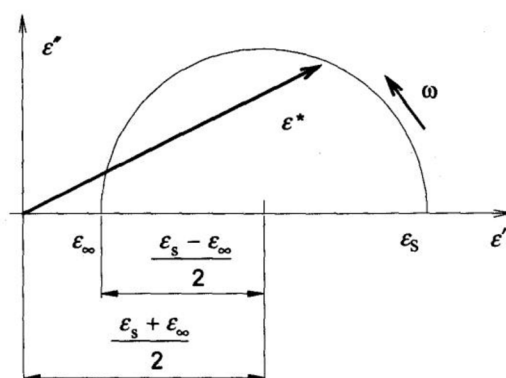
$$\text{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \omega^2 \tau^2} \quad (15)$$

Debyeovy rovnice popisují jen chování dielektrika s jednu relaxační dobu, neboli platí pro jeden mechanismus polarizace s jednou konkrétní relaxační dobou, a navíc se počítá s tím, že se nosiče dipólových momentů vzájemně neovlivňují a že všechny dipóly mají stejnou relaxační dobu.

1.6.2 Cole-Coleova rovnice

K. S. Cole a R. H. Cole ověřili, že Debyeovy rovnice skutečně platí. Eliminací členu $\omega \tau$ získali vztah

$$\varepsilon'(\omega) - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} + (\varepsilon''(\omega))^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right)^2. \quad (16)$$



Obr. 4 Cole-Cole diagram, převzato z [3]

Grafické znázornění tohoto vztahu se nazývá Cole-Cole kruhový diagram. Je sestaven na základě předpokladů jednoho polarizačního mechanismu s jednou relaxační dobou. Průběh

komplexní permitivity reálného dielektrika je pak dán superpozicí jednotlivých Debyeových mechanismů s různými relaxačními dobami. Při spojitém rozdělení relaxačních dob v intervalu 0 až nekonečno se získá pro komplexní permitivitu tvar

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \int_0^\infty \frac{y(\tau)d\tau}{1 + j\omega\tau}, \quad (17)$$

kde $y(\tau)$ je distribuční funkce udávající podíl dipólů, jejichž relaxační doby leží v intervalu mezi τ a $\tau + d\tau$.

Největším problémem vyjádření komplexní relativní permitivity je určení distribuční funkce odpovídajících relaxačních dob. Popis vzájemného působení polárních částic je značně složitý. Proto se používá aproximace komplexní permitivity pomocí vhodné analytické funkce. Bratři Coleové vyjádřili relativní permitivitu vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha}}, \quad (18)$$

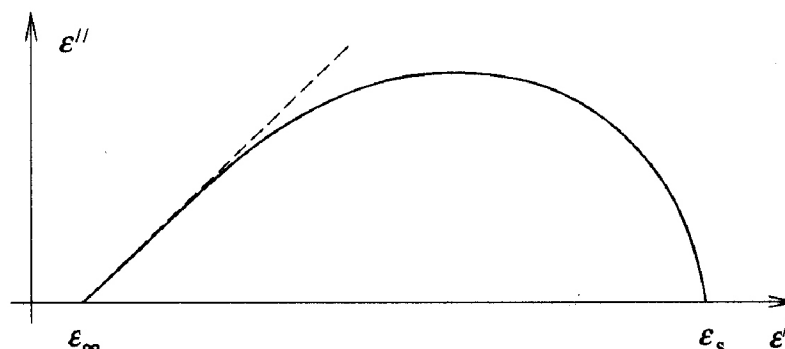
kde τ_1 je nepravděpodobnější relaxační doba, okolo níž jsou relaxační doby rozloženy podle distribuční funkce a α je distribuční parametr určující šířku rozdělení, čím je větší, tím více se střed půlkružnice Cole-Cole diagramu posunuje pod reálnou osu.

1.6.3 Cole-Davidsonova rovnice

Davidson a Cole vyjádřili vztah pro komplexní permitivitu ve tvaru

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^\gamma}, \quad (19)$$

kde pro distribuční parametr γ platí, že leží v intervalu $0 < \gamma < 1$. Po eliminaci $\omega\tau_1$ se dostane grafická závislost uvedená na (Obr. 5), která se při vysokých frekvencích odlišuje od půlkružnicového průběhu.



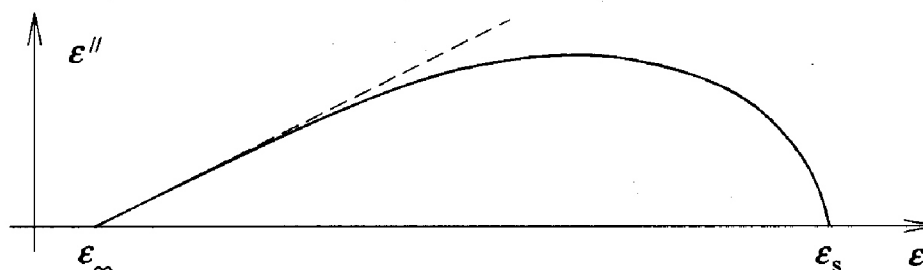
Obr. 5 Davidsonův-Coleův diagram s jedním distribučním parametrem, převzato z [3]

1.6.4 Havriliak-Negami rovnice

Havriliak a Negami upravili vztah pro komplexní permitivitu následujícím způsobem

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha})^\beta}, \quad (20)$$

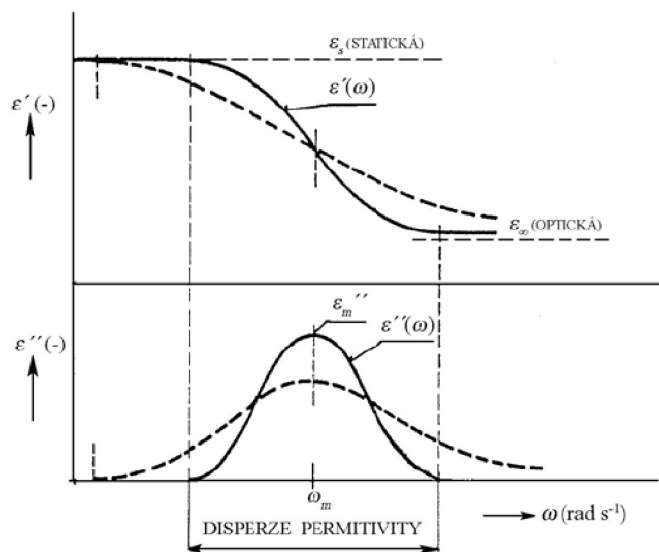
kde pro parametr charakterizující šířku relaxačního spektra α platí $0 < \alpha < 1$, a pro parametr charakterizující asymetrii disperzní křivky platí $0 < \beta < 1$. Určení parametru α, β, τ_1 je poměrně náročné.



Obr. 6 Havriliak-Negamiho diagram s dvěma distribučními parametry, převzato z [3]

1.7 Metoda dielektrické relaxační spektroskopie ve střídavém poli

Dielektrická relaxační spektroskopie je metoda, kterou lze použít ke studiu různých druhů materiálových a dielektrických soustav. Principem dielektrické relaxační spektroskopie je sledování odezvy polarizace částic na základě změny frekvence elektrického pole. Měření frekvenční závislosti složek komplexní permitivity je možné sledovat ve střídavém elektrickém poli. Ve stejnosměrném elektrickém poli se měří časová závislost nabíjecího a vybíjecího proudu. Pro úplné posouzení se musí sledovat chování materiálů při různé teplotě, relativní vlhkosti a intenzitě elektrického pole.



Obr. 7 Závislost relativní permitivity a ztrátového čísla na úhlovém kmitočtu, převzato z [8]

2 Elektrické stárnutí

Elektrické stárnutí zahrnuje účinky působení elektrického pole a vznik částečných výbojů, plazivých proudů, elektrických stromečků, účinků prostorových nábojů.

Elektrické namáhání bylo dlouho rozdělováno, pouze na stejnosměrné a střídavé. Toto rozdělení spolu s rozvojem moderních technologií nedokázalo obsáhnout všechny aspekty degradace. V současné době se pro diagnostiku elektrického namáhání používá ještě pulzní namáhání.

Možné zkušební postupy pro zjištění životnosti elektroizolačního materiálu nebo elektroizolačního systému jsou destruktivní a nedestruktivní.

2.1 Elektrické a vodní stromečky

Elektrické pole (obzvláště stejnosměrné) může být zodpovědné za rozložení a odtržení iontů, způsobující zhoršení izolačních vlastností, tak že se zvýší ztráty bez viditelné degradace. Vážnější formy degradace jsou však viditelné. Hlavní procesy stárnutí materiálů jsou elektrické stromečky, vodní stromečky a částečné výboje.

Elektrické a vodní stromečky se pod mikroskopem objeví jako stromečkovité útvary, bez pravidelné struktury. Když jsou elektrické stromečky zkoumány zřetelně, lze nalézt, že se skládají ze spojitých kanálků o rozměrech několik mikronů v průměru a s větvemi několik desítek mikronů dlouhých. Stěny kanálků nejsou vždy zuhelnatělé a jsou slabě vodivé. V izolantu se tedy může průraz vyskytnout, jestliže se stromeček proroste napříč izolací. Nicméně v praxi je možné, že průraz nastane i mnohem dříve. Elektrické stromečky nejsou vizuálním aspektem skutečného mechanismu elektrického průrazu. Místo toho jsou považovány za část souhrnného poškození izolace elektrickým namáháním vedoucí k zvětšení možnosti poruch.

Vodní stromečky se vyskytují v mnohem slabších elektrických polích, než je potřeba pro vznik elektrických stromečků. Nezbytnou podmínkou jejich vzniku je kontakt izolantu s vodním elektrolytem. Množství výskytu vodních stromečků je velké, ale jen velmi málo poškozující izolaci ve vlhkých podmínkách, přesto jejich dostatečné nahromadění může zapříčinit vznik elektrického průrazu.

2.2 Modely elektrického stárnutí

Pro modelování vlivu elektrického pole na dobu života materiálu jsou používány následující modely:

Exponenciální model (Obr. 8)

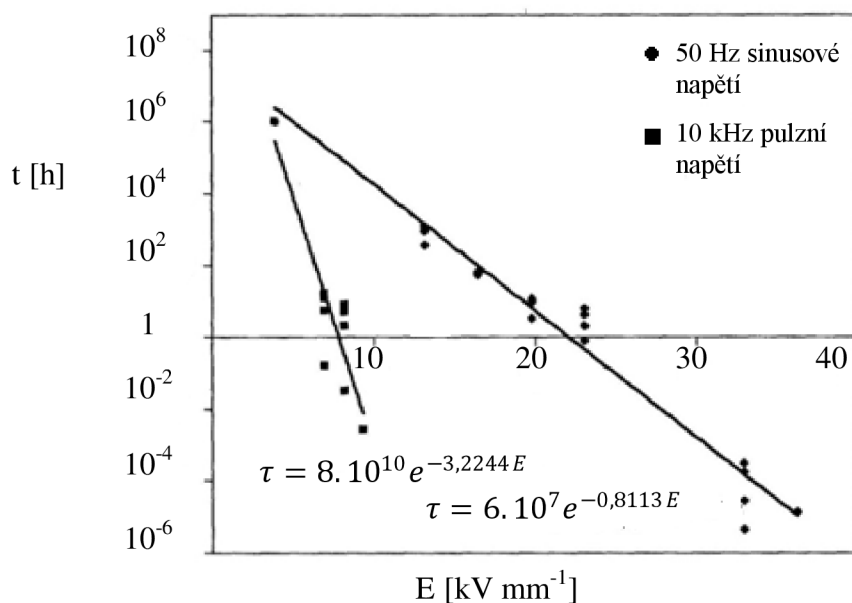
$$\tau_E = e^{-bE} \quad (21)$$

a mocninný model (Obr. 9)

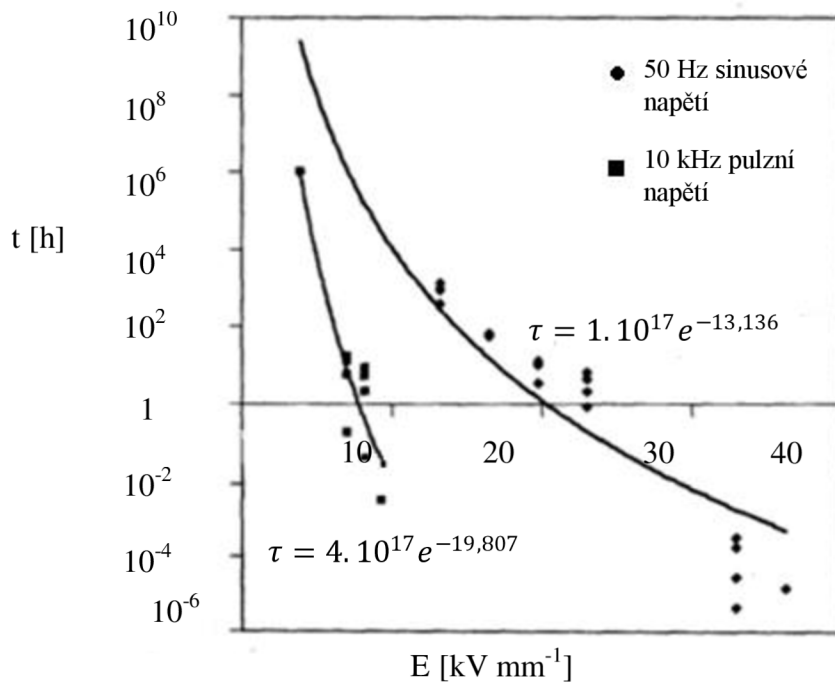
$$\tau_E = kE^{-n} \quad (22)$$

Zmíněné modely popisují stárnutí v libovolném materiálu, který je vystaven působení elektrického pole. Pro modely není třeba znát dokonale všechny procesy, které elektrické pole v materiálu vyvolává. Model není závislý ani na struktuře systému ani na konfiguraci elektrod a rozložení elektrického pole.

Tyto modely ovšem selhávají při nižších hladinách intenzity elektrického pole. To je vysvětlováno teorií, podle které existuje určitá prahová intenzita, pod kterou již elektrické pole stárnutí neovlivňuje.



Obr. 8 Životnost materiálu při střídavém napětí 50 Hz a pulzním napětí 10 kHz dle exponenciálního modelu, převzato z [2]



Obr. 9 Životnost materiálu při střídavém napětí 50 Hz a pulzním napětí 10 kHz dle mocninného modelu, převzato z [2]

3 Měření elektrických veličin izolačních materiálů

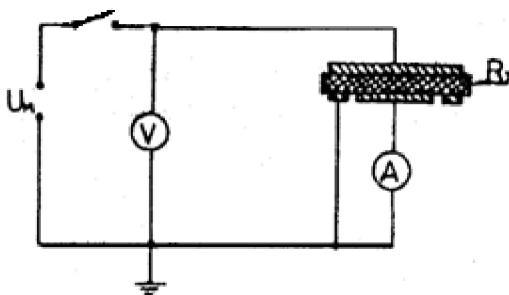
3.1 Měření elektrického odporu

3.1.1 Voltampérová metoda

Princip voltampérové metody vychází ze zapojení uvedeného na (Obr. 10). Hodnotu neznámého odporu R_x , se určí ze vztahu

$$R_x = \frac{U_M}{I}, \quad (23)$$

kde U_M je hodnota zkušební napětí, I proud protékající vzorkem materiálu.



Obr. 10 Schéma zapojení voltampérové metody, převzato z [1]

Citlivost této metody je dána citlivostí přístroje pro měření proudu. Pro kvalitní materiál je vhodnější použít elektrometr nebo galvanometr.

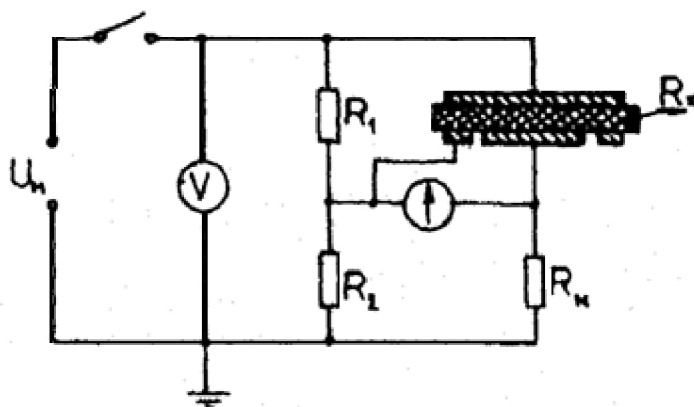
3.1.2 Můstková metoda

Tato metoda vychází ze známého principu srovnávání neznámého odporu se známým odporem veliké hodnoty podle schématu (Obr. 11)

Hodnota neznámého odporu R_x se určí podle vzorce

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N, \quad (24)$$

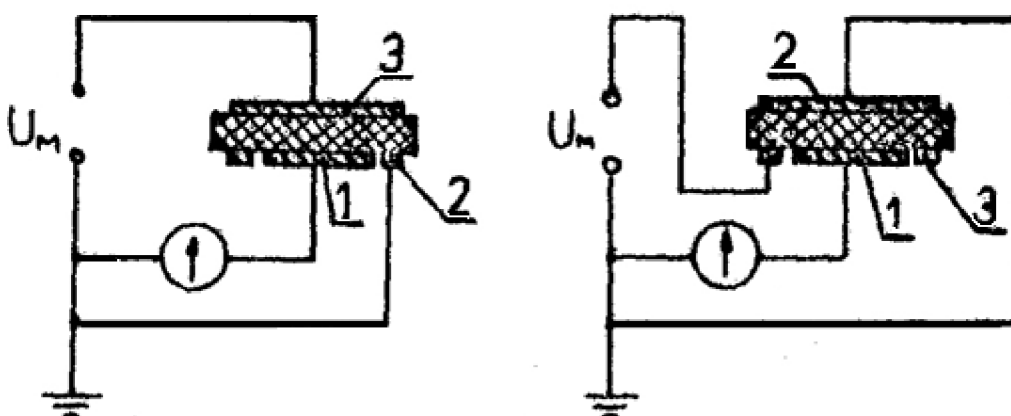
kde R_N je referenční odpor, R_1 a R_2 jsou poměrové odpory.



Obr. 11 Schéma zapojení můstkové metody, převzato z [1]

3.1.3 Zapojení elektrodového systému

Pro měření vnitřního a povrchového odporu se používá tříelektrodový systém podle schématu (Obr. 12).



1 - měřicí elektroda, 2 - stínící elektroda, 3 - napěťová elektroda

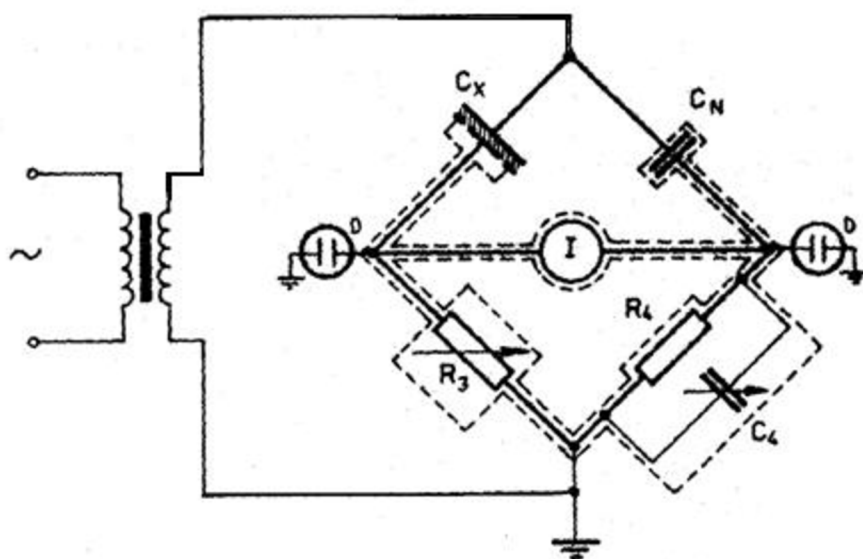
Obr. 12 Schéma zapojení pro měření vnitřního a povrchového odporu, převzato z [7]

Pro deskové materiály se používají nejčastěji kruhové elektrody. Průměr měřicí elektrody má být minimálně desetinásobek tloušťky zkušební vzorku. Průměr napěťové elektrody, stejně jako průměr stínící elektrody má být roven minimálně vnitřnímu průměru měřicí elektrody zvětšenému o dvojnásobek tloušťky zkušební tělesa.

3.2 Měření ztrátového činitele a permitivity

3.2.1 Metoda Scheringova můstku

Jedna z nejpoužívanějších metod pro měření ztrátového činitele je metoda Scheringova můstku. Můstek sestává ze dvou hlavních částí. První část je umístěna ve vysokonapěťovém prostoru zkušebny, a další části sloužící k vyvažování mimo tento prostor. Galvanické oddělení obou tvoří vzorek v příslušném elektrodovém systému a vysokonapěťový kondenzátor.



C_x - měřený vzorek, D - svodiče přepětí, R_3 , R_4 , C_4 - součásti dekády

Obr. 13 Scheringův vysokonapěťový můstek, převzato z [2]

Pro usnadnění výpočtu ztrátového činitele při frekvenci 50 Hz je voleno $R_4 = 1000/\pi$ a výpočet ztrát se dělá při uvažování sériového náhradního schématu.

Pro můstek platí

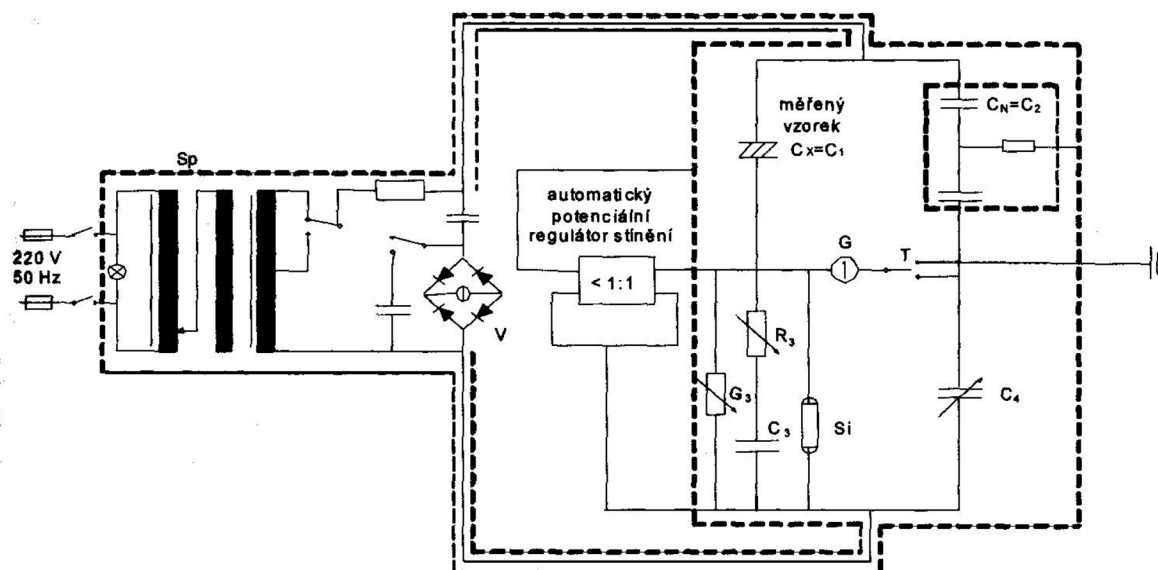
$$C_S = C_X = C_n \frac{R_4}{R_3}, \quad (25)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s = \omega R_4 C_4, \quad (26)$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,1 C_4 \text{ pro } R_4 = \frac{1000}{\pi}. \quad (27)$$

3.2.2 Metoda čtyřkapacitního můstku

Můstek má ve všech větvích kapacity, což má za následek zvýšenou impedanci v jednotlivých větvích, a tím vyšší citlivost i přesnost měření. Můstek má zabudovaný vlatní napájecí zdroj, který pracuje v rezonančním zapojení a zaručuje sinusový tvar křivky o frekvencích 50 Hz bez vyšších harmonických. Umožňuje práci s napětím do 2000 V.



C_x - měřený vzorek, C_N - bezztrátový kapacitní normál, G_3 - vodivostní dekáda, S_P - napájení, G - nulový indikátor, T - přepínač můstku, stínění, V - Voltmetr.

Obr. 14 Scheringův čtyřkapacitní můstek, převzato z [2]

Pro vyvážený můstek platí následující vztah pro číselnou hodnotu C_x :

$$C_x[pF] = C_N[pF] \frac{C_3[\mu F]}{C_4[\mu F]} = 100\pi \frac{1}{C_4\pi} = \frac{100}{C_4[\mu F]} \quad (28)$$

4 Drážková izolace

Drážková izolace je přídavnou izolací mezi vinutím a stěnami drážky. Jejím účelem je chránit vinutí před poškozením o stěny drážky. Materiály, které se používají jako drážková izolace, jsou drážková lepenka, vícevrstvé ohebné materiály, Nomex a kombinace materiálů.

Mezi vlastnosti, které má mít drážkové izolace, patří odpovídající elektrická pevnost, vysoký izolační odpor nezávislý na vlhkosti, odpovídající mechanické vlastnosti, dobré teplotní vlastnosti a odolnost vůči chemickým vlivům.

4.1 Nomex

Nomex je syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu aramidu. Aramidové částičky jsou zpracovány běžnými papírenskými technologiemi do podoby papíru, který je dále zpevňován válcováním mezi válce s lesklým povrchem při vysokých teplotách.

Používá se u točivých strojů – vodiče, cívky, drážky, vývody motorů i generátorů; u transformátorů – izolace závitů, přívodů; a jiné elektrotechnické výrobě jako kostry cívek nebo tvarované součástky.

Nomex má vysokou pevnost v tahu, je nehořlavý a samozhášivý, odolává účinkům chemikálií, rozpouštědel a záření, je krajně snášenlivý se všechny systémy na bázi laků a pryskyřic, snáší se s minerálními i syntetickými oleji používanými v transformátorech, odolává teplotám do 220° C a má výborné elektrické vlastnosti. Elektrická pevnost $E_p = 40$ kV mm⁻¹, relativní permitivita $\epsilon_r = 2,5$, vnitřní vodivost ρ_v je řádově 10¹⁶ Ω m⁻¹

4.2 Kapton

Kapton je polyamid, vznikající bipolykondenzační reakcí aromatického dianhydridu a aromatického diaminu. Dodává se ve formě fólií.

Používá se k izolování vinutí elektrických strojů. Jeho aplikací lze například snížit hmotnost vinutí trakčních motorů.

Působením tepla netaje, nehoří, nerozpouští se v organických rozpouštědlech, má výborné mechanické vlastnosti a elektrické vlastnosti. Relativní permitivita $\epsilon_r = 3$ až 3,5, ztrátový činitel $\text{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-3}$, vnitřní rezistivita $\rho_v = 1,5 \cdot 10^{15}$ Ω m⁻¹, elektrická pevnost E_p přibližně 6 kV mm⁻¹.

5 Experimentální část

5.1 Popis experimentu

Experimentální část se zabývá studiem elektrického namáhání materiálu vlivem střídavého pole o zvýšené intenzitě na drážkovou izolaci NKN (Nomex-Kapton-Nomex). Na měření byly použity vzorky drážkové izolací o rozměrech 80x80 mm velké a tlusté 0,29 μm . Vzorky materiálu Isonom NKN byly namáhány elektrickým polem o hodnotě 1,5 kV (vzorky E1, E2, E3) a 2 kV (vzorky E4, E5, E6) ve stohodinových cyklech. Celková doba stárnutí byla 300 hodin. Vzorky se pak budou po každých 100 hodinách vyhodnocovat metodou dielektrické relaxační spektroskopie, pomocí měřicích přístrojů Agilent 4285 a E4980 při napětí 1V.

5.2 Postup měření

Pomocí měřicích přístrojů Agilent a programu Vee Pro 8 se změří frekvenční charakteristiky kapacity a ztrátového činitele. Daný vzorek se měří 3x pro každý rozsah frekvencí.

Relativní permitivita se stanoví ze vztahu

$$\varepsilon' = \frac{C_X}{C_0}, \quad (29)$$

kde C_0 je geometrická kapacita vzorku vypočítaná z geometrických rozměrů vzorku.

Ta se vypočítá ze vztahu

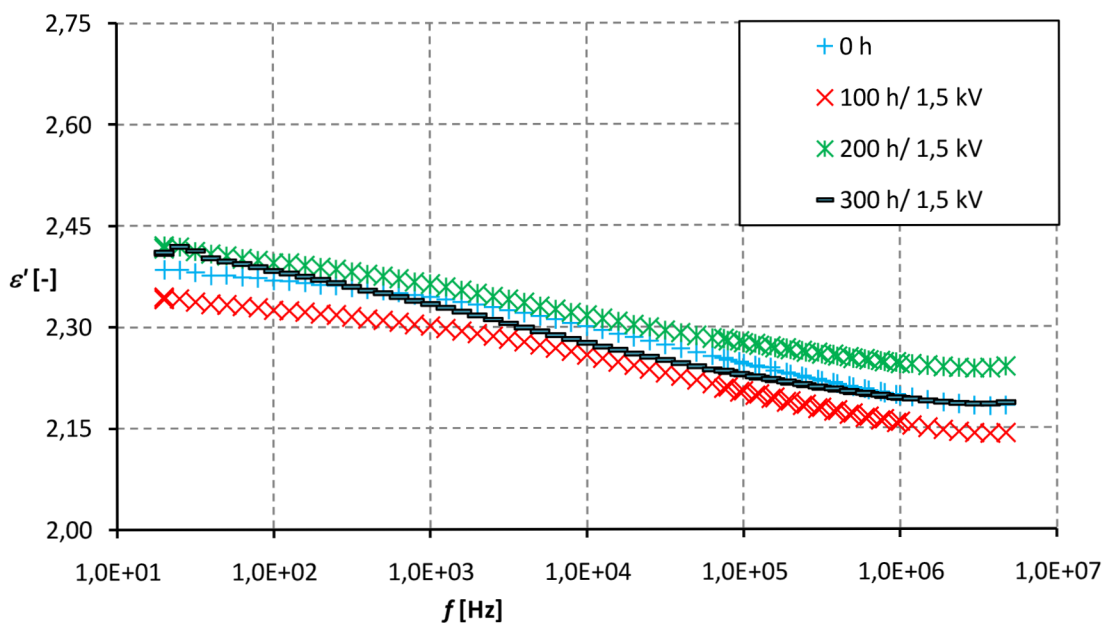
$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{\pi d_m^2}{4h}, \quad (30)$$

kde d_m je průměr vzorku, h je tloušťka vzorku.

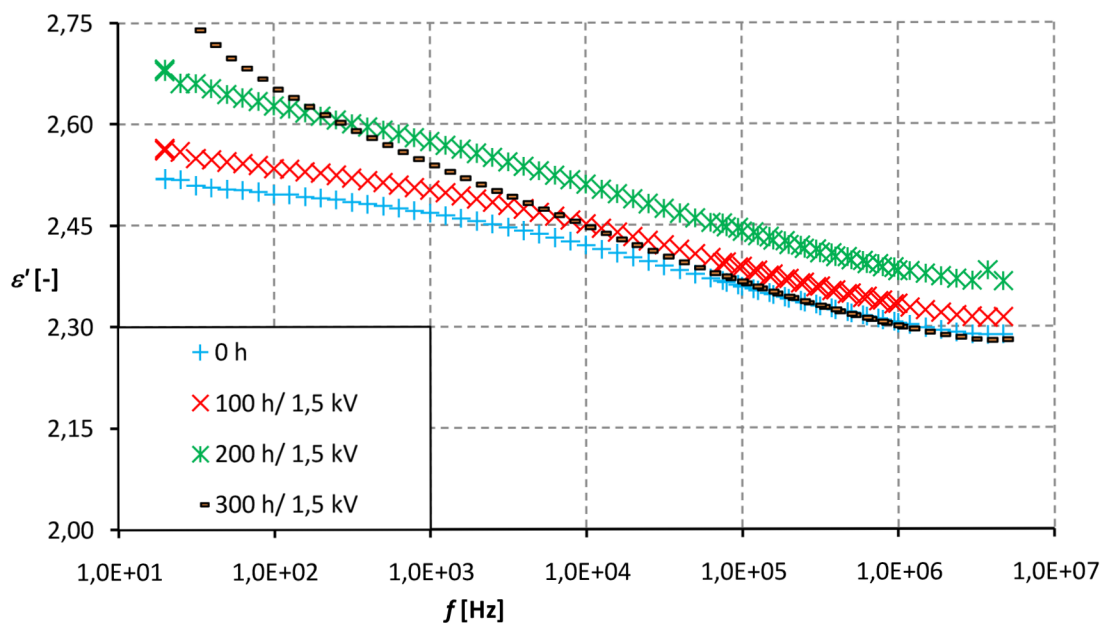
Ztrátové číslo se vypočítá ze vztahu

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta. \quad (31)$$

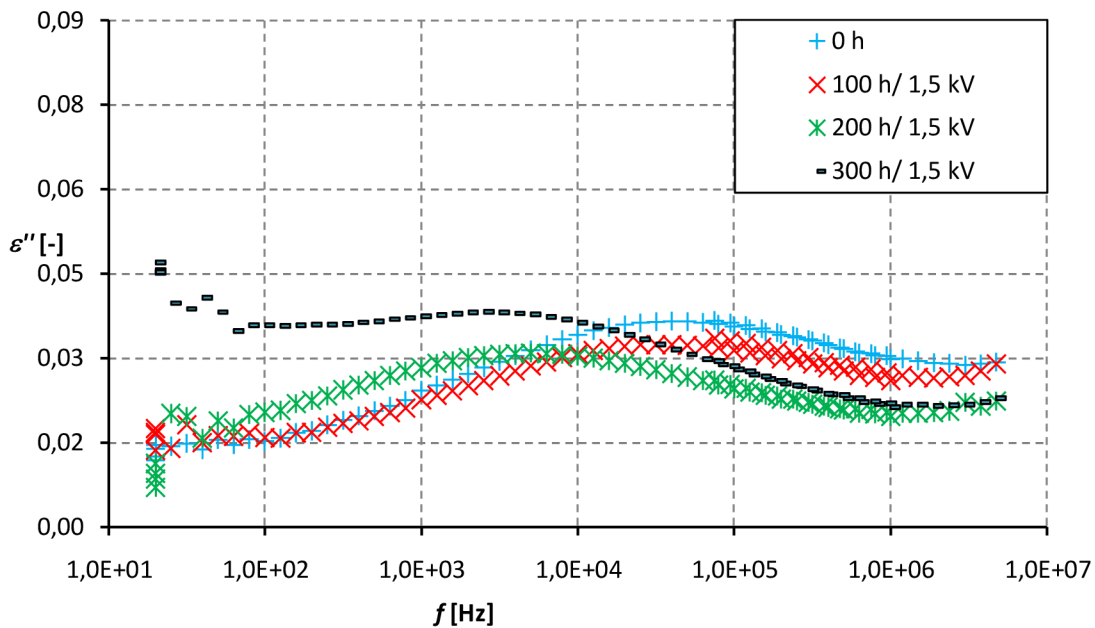
5.3 Grafické zobrazení naměřených hodnot



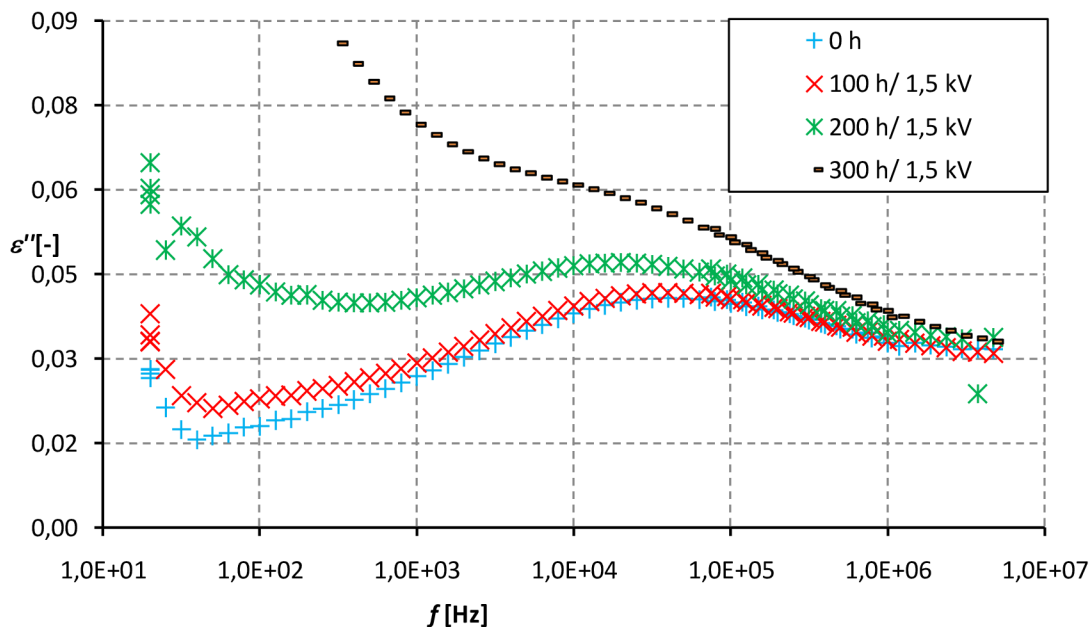
Obr. 15 Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)



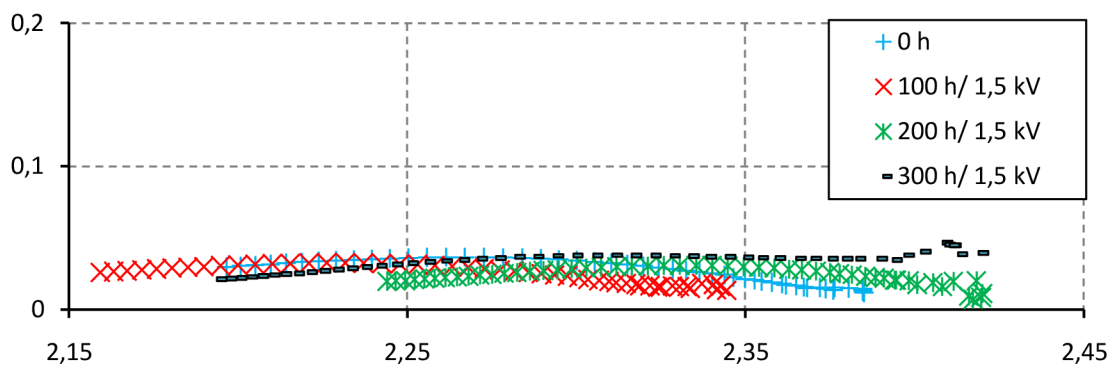
Obr. 16 Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)



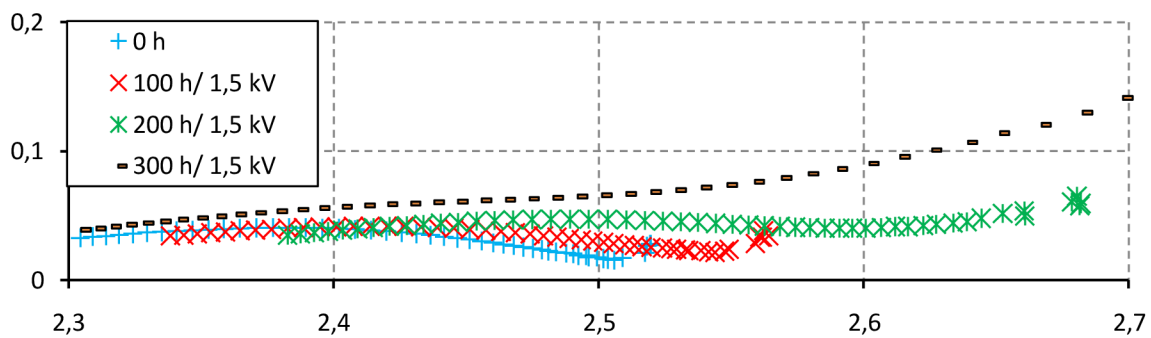
Obr. 17 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)



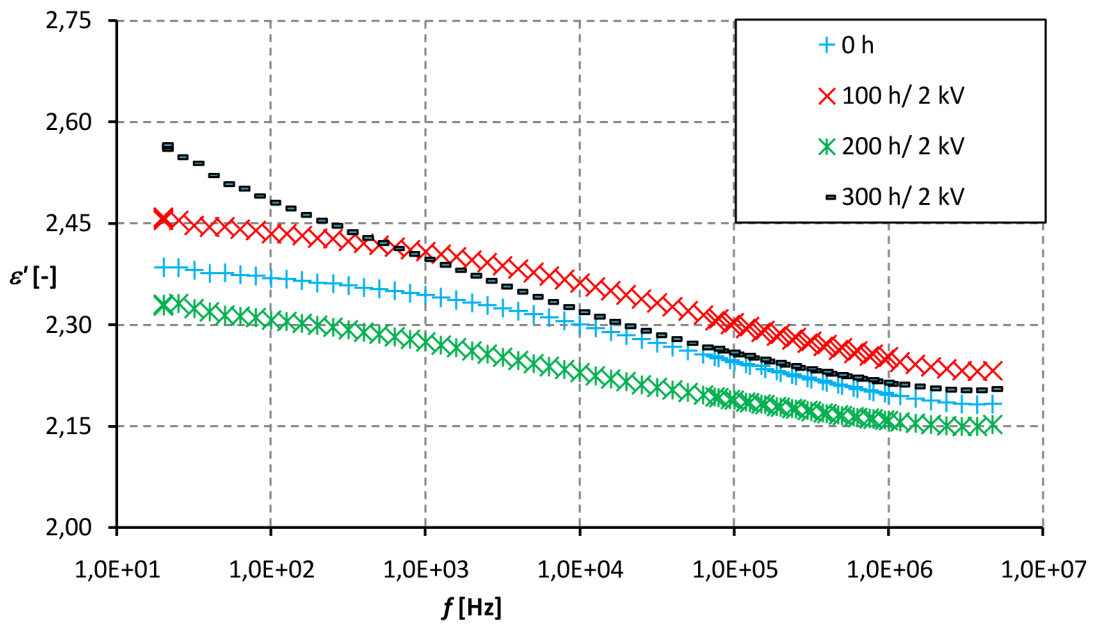
Obr. 18 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)



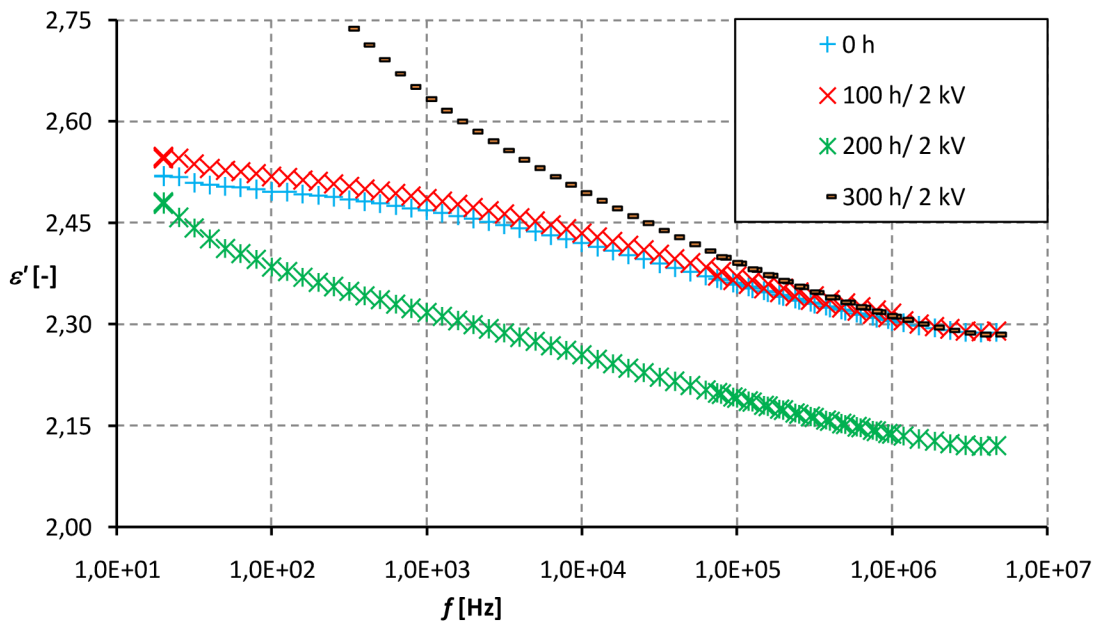
Obr. 19 Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)



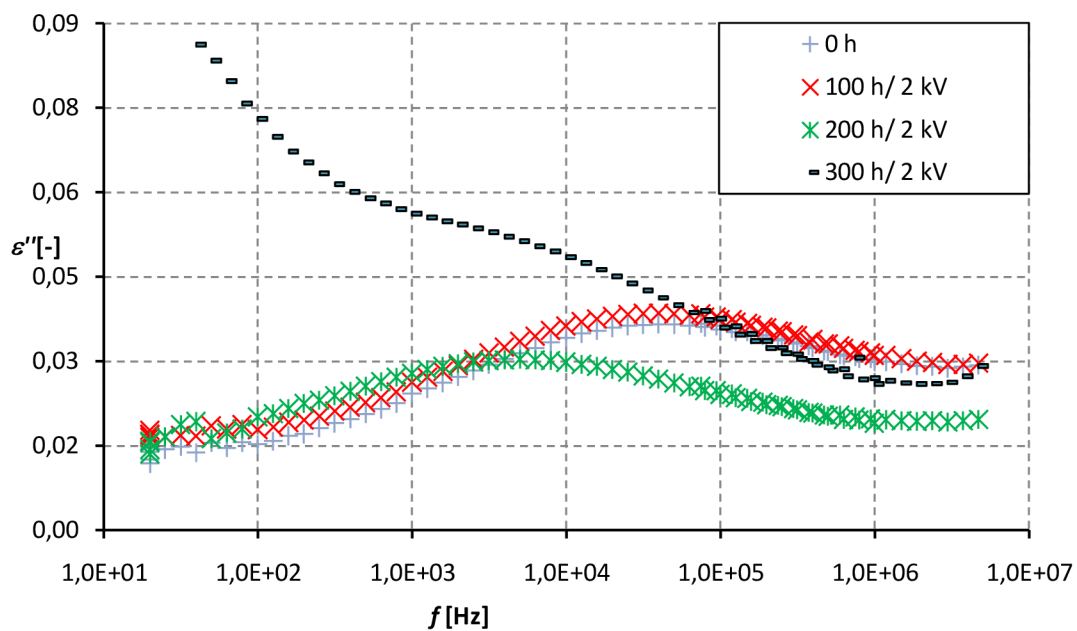
Obr. 20 Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 1,5 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)



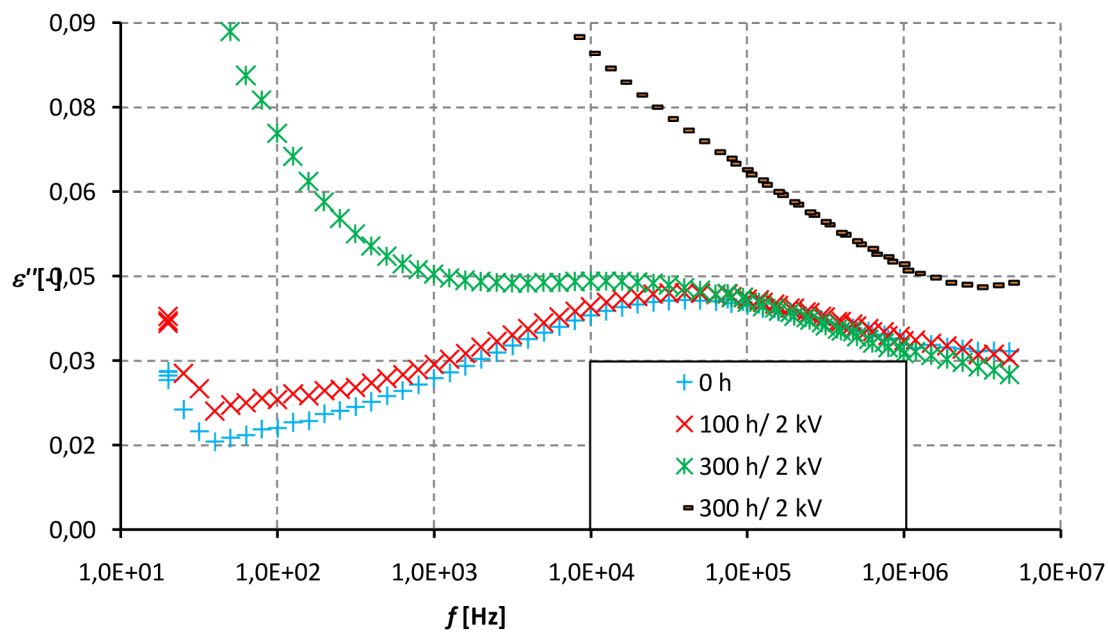
Obr. 21 Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)



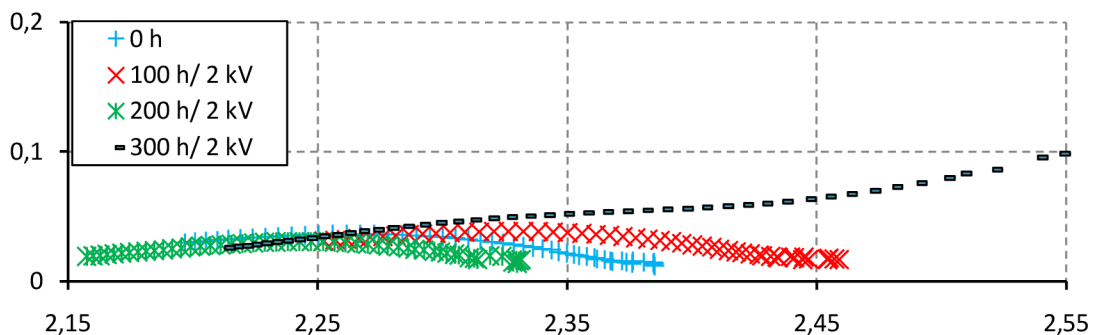
Obr. 22 Frekvenční závislost relativní permitivity s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)



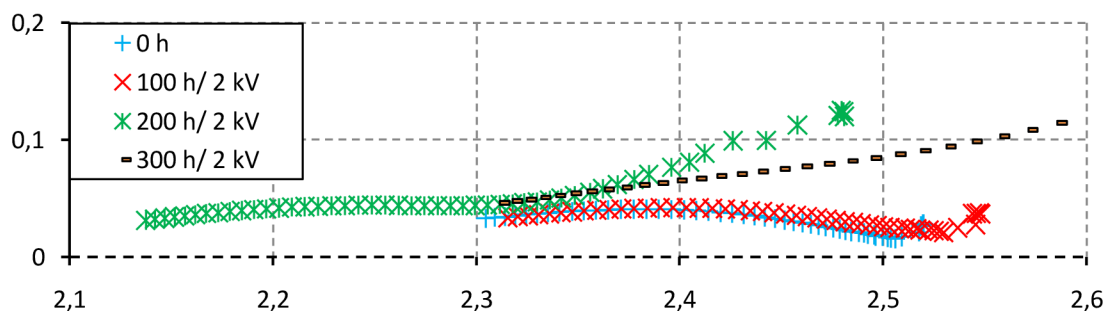
Obr. 23 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)



Obr. 24 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)



Obr. 25 Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti menší než 10 %)



Obr. 26 Cole-Cole diagram s parametrem doby namáhání při 2 kV (měřeno při relativní vlhkosti 43 %)

5.4 Použité měřicí přístroje a příslušenství

Při měření dielektrické relaxační spektroskopie byly použity měřicí přístroje HP Agilent E4980 a HP Agilent 4285. Měřicí přístroje byly řízené programem VEE PRO 8, který byl na školním počítači. Vzorky se upínaly do elektrodového systému pro pevná dielektrika 16451B.

5.5 Vyhodnocení experimentu

Při měření s relativní vlhkostí menší než 10 % po stohodinovém intervalu působení elektrického pole dochází u vzorků E1, E2, E3 ke snížení celkových ztrát. Po 200 hodinách působení elektrického pole se celkové ztráty sníží a dochází k posunu polarizačních ztrát k nižším frekvencím. Po 300 hodinách stárnutí se celkové ztráty zvýší i s malým nárůstem vodivostních ztrát při malých frekvencích (Obr. 17).

Při měření s relativní vlhkostí 43 % bylo vidět, že dochází postupně k nárůstu celkových ztrát (Obr. 18). Po 300 hodinách působení elektrického pole se prudce zvýší vodivostní ztráty zejména na nižších frekvencích a polarizační ztráty mají malý vliv.

U vzorků E4, E5, E6 měřených při vlhkosti menší než 10 % docházelo k podobnému jevu jako u vzorků E1, E2, E3 - snížení ztrát po 200 hodinách stárnutí a posunu polarizačních ztrát k nižším frekvencím (Obr. 23). Při měření vzorků s relativní vlhkostí 43 % rostou zejména vodivostní ztráty, až u 300 hodin působení elektrického pole nemají polarizační ztráty na celkové ztráty vliv (Obr. 24).

Hodnota relativní permitivity se vlivem vlhkosti zvýší asi o dvě až tři desetiny u vzorků namáhaných 1,5 kV a o jednu desetinu u vzorků namáhaných 2 kV.

6 Závěr

Elektrické namáhání je působení elektrického pole o dané intenzitě na materiál. Jedny z důležitých parametrů, které se sledují při elektrickém namáhání, jsou permitivita, ztrátový činitel, elektrický odpor, aktivity částečných výbojů a elektrická pevnost. Elektrické namáhání může způsobit vliv elektrických stromečků, vodních stromečků, plazivých proudů až k elektrickému průrazu, který má za následek ztrátu izolačních vlastností materiálu.

Mezi nedestruktivní diagnostické elektrické metody patří dielektrická relaxační spektroskopie v časové a kmitočtové oblasti. Princip dielektrické relaxační spektroskopie v časové oblasti je při působení stejnosměrného pole měření nabíjecího a vybíjecího proudu. Je to metoda náročná na čas. Za to rychlejší je metoda dielektrické relaxační spektroskopie v kmitočtové oblasti, kde se zkoumá vliv ztrát na kmitočtovém spektru.

Experimentální část práce odhalila odolnost materiálu ještě po 200 hodinách působení elektrického, co se týče celkových ztrát, při nízké relativní vlhkosti. Tyto podmínky, ale nelze moc snadno v provozu dodržet. Při relativní vlhkosti 43 % po 200 hodinách působení elektrického pole už izolační materiál přestává hlavně u nižších frekvencí dobře izolovat a vznikající ztráty jsou několikanásobné. Po 300 hodinách i při nulové vlhkosti dochází k nárůstu vodivostních ztrát. Z experimentu tedy vyplývá, že drážková izolace po 200 hodinách ztrácí své izolační vlastnosti a její životnost je tedy menší než 200 hodin.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] Mentlík, V. *Diagnostika Izolantů*. Ediční středisko Vysoké školy strojní a elektrotechnické. Plzeň 1986. 62 stran.
- [2] Mentlík, V., Pihera, J., Polanský, R., Prosr, P., Trnka, P. *Diagnostika zařízení*. BEN – Technická literatura. Praha 2008. 440 stran. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] Mentlík, V., *Dielektrické prvky a systémy*. BEN – Technická literatura. Praha 2006. 240 stran. ISBN 80-7300-189-6.
- [4] Stránil, R., *Dielektrická relaxační spektroskopie*, Vysoké učení technické v Brně. Brno 2008. 31 stran, ISBN 978-80-214-3572-8.
- [5] Dissado, L., A., Fothergill, J. C., *Electrical degradation and breakdown in polymers*, 620 stran, ISBN 0-86341-196-7
- [6] Rozsivalová, Z., Křivák, P., Vaněk, J. *Materiály a technická dokumentace, Laboratorní cvičení*. Vysoké učení technické v Brně. Brno. 79 stran .
- [7] Jiráček, J., Autrata, R., Liedermann, K., Rozsivalová, Z., Sedlaříková, M. *Materiály a technická dokumentace, Část materiály v elektrotechnice*. Vysoké učení technické v Brně. Brno. 129 stran.
- [8] Jiráček, J., Rozsivalová, Z., *Materiály a výrobní procesy, Laboratorní cvičení*. Vysoké učení technické v Brně. Brno. 49 stran.
- [9] Bouaicha, A., Fofana, I., *Dielectric Spectroscopy Techniques as Quality Control Tool: A Feasibility Study*, IEEE Electrical Insulation Magazina, roč. 2009, č. 7, s 0883-7554.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a, k, b, n [-]	empirické konstanty
C_p [F]	paralelní kapacita
C_s [F]	sériová kapacita
D [C m ⁻²]	elektrické indukce
d_m [m]	průměr vzorku
E [V m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
E_p [V m ⁻¹]	elektrická pevnost
f [Hz]	frekvence
h [m]	tloušťka vzorku
I [A]	elektrický proud
l [m]	délka
k [J K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
NKN	Nomex-Kapton-Nomex
q [C]	náboj
P_Z [VA _r]	ztrátový výkon
$R_{1,2,3,4}$ [Ω]	poměrové odpory
R_N [Ω]	referenční odpor
R_p [Ω]	paralelní odpor
R_s [Ω]	sériový odpor
R_X [Ω]	neznámý odpor
t [s]	čas
T [K]	termodynamická teplota
$\text{tg}\delta$ [-]	ztrátový činitel
U [V]	elektrické napětí
U_M [V]	zkušební napětí
W [eV]	energie elektronů
y	distribuční funkce
α, β	distribuční parametry
γ [Sm ⁻¹]	konduktivita
δ [°]	úhel

$\varepsilon'' [-]$	ztrátové číslo
$\varepsilon' [-], \varepsilon_r [-]$	relativní permitivita
$\varepsilon^* [-]$	komplexní permitivita
$\varepsilon_0 [\text{F m}^{-1}]$	permitivita vakua
$\varepsilon_\infty [-]$	optická permitivita
$\varepsilon_s [-]$	statická permitivita
$\mu [\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}]$	pohyblivost částic
$\rho_V [\Omega]$	vnitřní rezistivita
$\rho_\rho [\Omega \text{m}]$	povrchová rezistivita
$\tau [\text{s}]$	relaxační doba
$\tau_E [\text{s}]$	doba života
$v [^\circ\text{C}]$	teplota
$\omega [\text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost