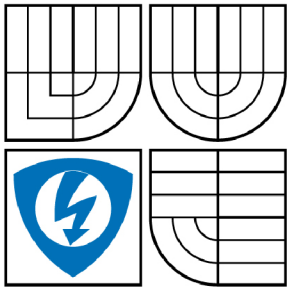


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

PŮSOBENÍ VLHKOSTI NA VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ VYSTAVENÝCH TEPELNÉMU A ELEKTRICKÉMU NAMÁHÁNÍ

THE MOISTURE EFFECT ON PROPERTIES OF INSULATING MATERIALS
EXPOSED TO THERMAL AND ELECTRICAL STRESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

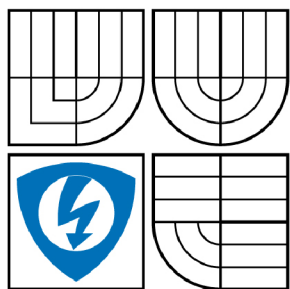
Bc. MICHAL JANOŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Janošek Michal Bc.

ID: 89284

Ročník: 2

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Působení vlhkosti na vlastnosti izolačních materiálů vystavených tepelnému a elektrickému namáhání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodou dielektrické relaxační spektroskopie ve frekvenční oblasti a prostudujte základní vlastnosti dielektrických materiálů vystavených účinkům střídavého elektrického pole.

Pozornost věnujte používaným životnostním zákonům pro tepelné a elektrické namáhání.

Sestavte pracoviště pro realizaci vícefaktorového namáhání a vzorky drážkové izolace podrobte tepelnému a elektrickému namáhání působením různých teplot a intenzit elektrického pole. Vzorky následně vystavte působení různých relativních vlhkostí. Ke zjištění aktuálního stavu izolačního materiálu využijte metodu dielektrické relaxační spektroskopie ve frekvenční oblasti a zaměřte se na vyhodnocení složek komplexní permitivity.

Posuďte vliv účinků elektrického a tepelného namáhání na dielektrické vlastnosti materiálu v průběhu navlhání. Podejte možnou fyzikální a matematickou interpretaci zjištěných výsledků měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

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 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.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Michal Janošek
Bytem: Lány 844, 763 61, Napajedla
Narozen (datum a místo): 19. 6. 1984, Vsetín

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Marie Sedlaříková, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako.....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Působení vlhkosti na vlastnosti izolačních materiálů
vystavených tepelnému a elektrickému namáhání

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zdenka Rozsivalová

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. 5. 2008

.....

.....

Nabyvatel

Autor

Abstrakt:

Tato diplomová práce pojednává o vlivu vlhkosti na dielektrické vlastnosti nestárnuté a tepelně, elektricky a kombinovaně namáhané drážkové izolace Isonom[®] NMN. Jsou zkoumány především obě složky komplexní permitivity během tepelného, elektrického a kombinovaného namáhání. Praktická část je zároveň zaměřena na návrh, realizaci a ověření funkčnosti pracoviště pro kombinované namáhání materiálů.

Abstract:

The diploma thesis with experimental verification influence moisture of the dielectric properties of non-aged and thermally, electric and multistress aged slot insulation Isonom[®] NMN. Above all both components of the complex permittivity are examined in dependence on frequency during the thermal, electric and multistress ageing. Practical part is specialized on design, realization and examination of workplace multistress ageing.

Klíčová slova:

elektroizolační systémy, elektrické namáhání, kombinované namáhání, komplexní permitivita, stárnutí, tepelné namáhání, vlhkost

Keywords:

electroinsulation system's, electrical stress, multistress ageing, complex permittivity, ageing, thermal stress, moisture

Bibliografická citace díla:

JANOŠEK, M. *Působení vlhkosti na vlastnosti izolačních materiálů vystavených tepelnému a elektrickému namáhání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. 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 30. 5. 2008

.....

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Zdence Rozsivalové za metodické vedení a cenné rady, které mi poskytla během mé práce. Dále bych chtěl poděkovat všem pracovníkům Ústavu elektrotechnologie VUT FEKT za pomoc v průběhu experimentu.

OBSAH

ÚVOD.....	8
1. TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 Fyzikální jevy v dielektriku.....	9
1.1.1 Dielektrická polarizace	9
1.1.2 Elektrická vodivost	10
1.1.3 Dielektrické ztráty.....	12
1.2 Komplexní permitivita	13
1.3 Navlhavost látek	17
1.3.1 Vlhkost vzduchu	17
1.3.2 Vlastní navlhavost látek	18
1.4 Stárnutí dielektrických materiálů	19
1.4.1 Teorie stárnutí.....	19
1.4.2 Tepelné namáhání	20
1.4.3 Elektrické namáhání.....	23
1.4.4 Kombinované namáhání	25
1.5 Složené materiály	27
1.5.1 Vlastnosti složených materiálů.....	27
1.5.2 Permitivita složených soustav	28
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
2.1 Zkušební vzorky	29
2.1.1 Vlastnosti zkušebních vzorků	29
2.1.2 Jednotlivé složky zkušebního vzorku	30
2.2 Použité zařízení.....	31
2.2.1 Měřicí přístroje	31
2.2.2 Tříelektroodový měřicí systém	32
2.2.3 Dvouelektroodový systém	33
2.2.4 Vysokonapěťový zdroj.....	34
2.2.5 Teplotní komora SteriCell 55.....	34
2.3 Metodika experimentu.....	34
2.4 Výsledky experimentu.....	36
3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	46
4 ZÁVĚR.....	52
5 POUŽITÁ LITERATURA.....	53
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	54

ÚVOD

Tendence v oblasti tvorby elektrických zařízení, její rozvoj a využití těchto zařízení v nejrůznějších podmínkách, klade stále vyšší požadavky na používaný materiál. Elektrické zařízení jako celek můžeme chápat i z hlediska jeho funkčních částí. Jsou to zejména systémy mechanické, elektrické, magnetické a dielektrické.

Izolanty jsou látky, používané především díky svým elektroizolačním vlastnostem k separaci dvou míst s různým potenciálem. Dielektrika jsou látky stejného charakteru jako izolanty (také nevedou elektrický proud), ale používají se jako látky, schopné po přiložení elektrického pole hromadit elektrickou energii.

Z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti jsou to právě materiály izolační, které stabilitou svých vlastností a především životností ovlivňují to, co od elektrického zařízení požadujeme. Proto je nutné při konstrukci každého elektrického zařízení vědět, jak dlouho budou použité materiály schopny plnit funkční vlastnosti, potřebné pro bezpečný a bezporuchový provoz zařízení. Je tedy nezbytné zkoumat průběh degradace izolačních materiálů.

Pro stárnutí dielektrického materiálu se používá namáhání pomocí tepelných cyklů, střídavého elektrického pole, působení vlhkosti, mechanické namáhání, a další. V současné době se stále více používá kombinace dvou a více činitelů, čímž lépe dosáhneme urychlených provozních podmínek. V různých intervalech se proces degradace zastaví a na materiálu jsou naměřeny jeho dielektrické vlastnosti. Pro zjišťování základních dielektrických vlastností zkoumaných materiálů slouží řada zkušebních metod. Jednou z nich je metoda dielektrické relaxační spektroskopie. Ta se zabývá získáváním poznatků o jednotlivých relaxačních a vodivostních procesech, vyskytujících se ve zkoumaném dielektriku.

Úkolem předložené diplomové práce je realizovat pracoviště pro kombinované namáhání a experimentálně prověřit základní dielektrické vlastnosti vzorků drážkové izolace v průběhu teplotního, elektrického a kombinovaného namáhání. Sledovány jsou především obě složky komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu a vliv vlhkosti na dielektrické vlastnosti materiálu.

1. Teoretická část

1.1 Fyzikální jevy v dielektriku

Dielektrikum, tedy látka schopná akumulovat elektrickou energii, a izolant, tedy látka schopná elektrickou energii izolovat, podléhají působením elektrického pole souboru fyzikálních jevů. Mezi základní fyzikální jevy v těchto látkách se řadí zejména **dielektrická polarizace, elektrická vodivost, dielektrické ztráty a elektrický výboj.**

K fyzikálním jevům je nutno přiřadit základní elektrické veličiny. Jsou jimi:

- relativní permitivita ϵ' [-]
- vnitřní rezistivita ρ_v [$\Omega \cdot m$]
- povrchová rezistivita ρ_p [Ω]
- ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ [-]
- elektrická pevnost E_p [$V \cdot m^{-1}$]

Dielektrika se skládají z atomů, molekul a iontů. Molekuly se z hlediska způsobu uspořádání vázaných nábojů dělí na molekuly polární a nepolární (dipólové a neutrální). Molekuly polární mají nesymetrickou stavbu a charakterizují se stálým elektrickým momentem i bez přítomnosti elektrického pole. Po přiložení elektrického pole se dipólové molekuly natáčejí ve směru tohoto elektrického pole.

1.1.1 Dielektrická polarizace

Dielektrická polarizace je fyzikální jev, při němž se na malé vzdálenosti posouvají elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných pozic do nových. Tento jev nastává působením vnějšího i vnitřního elektrického pole. Dipólové molekuly, jestliže je látka obsahuje, se pak orientují ve směru přiloženého elektrického pole. Mírou polarizace jsou vektor polarizace P [$C \cdot m^{-2}$] a relativní permitivita ϵ' [-], která souvisí se schopností polarizace látky – polarizovatelností.

Při působení elektrického pole se často v dielektrickém materiálu vyskytuje několik druhů polarizací neboli polarizačních mechanismů. [1]

Klasifikace polarizačních mechanismů

- **Polarizace rychlé** – nezávisí na kmitočtu, mají krátkou dobu trvání, probíhají beze ztrát.
 - 1) Polarizace elektronová – vyskytuje se u všech dielektrik, beze ztrát, nezávisí na teplotě.
 - 2) Polarizace iontová-pružná – vyskytuje se jen u iontových krystalů, beze ztrát, je závislá na teplotě.
- **Polarizace pomalé** – polarizace přibývají velmi pomalu, závisejí na teplotě a na kmitočtu, vždy provázeny ztrátami.
 - 1) Polarizace dipólová – vyskytuje se u polárních látek.
 - 2) Polarizace iontová-relaxační – vyskytuje se v iontových látkách.
- **Polarizace zvláštní**
 - 1) Polarizace mezivrstevová (migrační).
 - 2) Polarizace samovolná (spontánní).
 - 3) Polarizace trvalá (permanentní).
 - 4) Polarizace rezonanční – vyskytuje se u všech dielektrik, projevuje se ve viditelném spektru kmitočtů.

1.1.2 Elektrická vodivost

Mechanismus elektrické vodivosti spočívá v pohybu volných nebo slabě vázaných nábojů v elektrickém poli. Elektrickou vodivost lze rozdělit podle druhu nosičů nábojů 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 lze elektrickou vodivost dielektrických látek rozdělit podle povahy na vnitřní a povrchovou, přičemž povrchovou vodivost lze pozorovat pouze u tuhých látek. Vnitřní konduktivita γ_v [S.m⁻¹] je pro jeden druh nosičů dána vztahem (1.1):

$$\gamma_v = n \cdot q \cdot \mu, \quad (1.1)$$

kde n [m⁻³] je koncentrace nosičů elektrického náboje, q [C] je elektrický náboj nosiče a μ [m².V⁻¹.s⁻¹] je driftová pohyblivost. Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů závisí na jejich chemickém složení, struktuře látek, defektech vnitřního uspořádání a na druhu a obsahu nečistot a příměsí. [1]

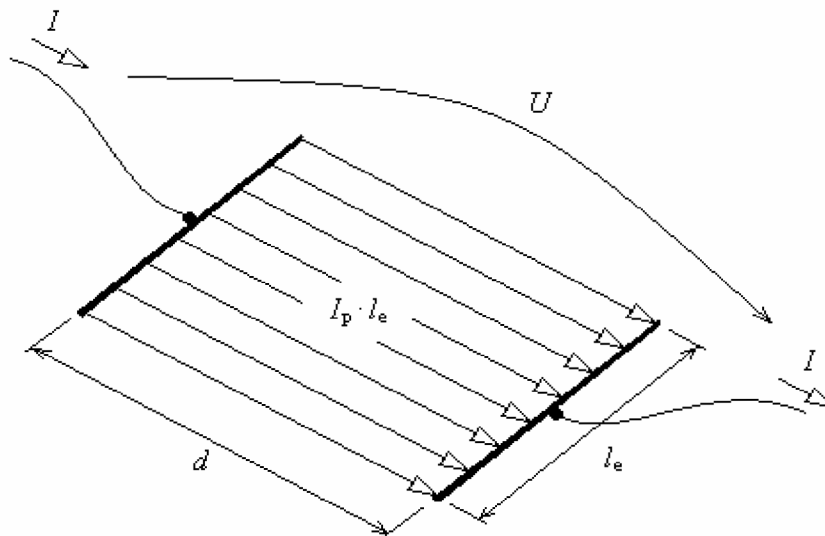
Měrná povrchová elektrická vodivost γ_p [S] se udává jako podíl proudu tekoucího po povrchu dielektrika, připadajícího na jednotku délky elektrody I_p [A.m⁻¹], a intenzity elektrického pole E [V.m⁻¹]:

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E}. \quad (1.2)$$

Za předpokladu, že se jedná o prostorový děj, jak je znázorněno na obr. 1.1, lze vztah (1.2) upravit:

$$\gamma_p = \frac{I}{l_e} \cdot \frac{d}{U} = \frac{I}{U} \cdot \frac{d}{l_e}, \quad (1.3)$$

kde I [A] je celkový proud tekoucí po povrchu izolantu, U [V] je napětí na elektrodách, d [m] je jejich vzdálenost a l_e [m] je délka elektrod na povrchu izolantu.



Obr. 1.1 Proud tekoucí po povrchu izolantu

Ze vztahu (1.3) vyplývá, že i povrchovou elektrickou vodivost lze hodnotit na základě měrného povrchového elektrického odporu:

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{l_e}{d}, \quad (1.4)$$

kde R_p [Ω] je povrchový elektrický odpor materiálu naměřený mezi paralelními elektrodami. Povrchová elektrická vodivost izolantu je dána pohybem volných nosičů

elektrického náboje na jeho povrchu. Volné nosiče náboje vznikají především disociací molekul nečistot na povrchu izolantu, přičemž je disociace silně podporována absorbovanou vlhkostí. [2]

1.1.3 Dielektrické ztráty

Technický izolant má na rozdíl od ideálního nenulovou elektrickou vodivost. Obsahuje nečistoty nebo příměsi a má určitou vlhkost, což při přiloženém elektrickém poli podmiňuje vznik nestacionárních přesunů uvnitř dielektrika. To vede ke ztrátám energie v dielektriku, které představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce při vložení materiálu do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení stejnosměrného i střídavého elektrického pole a jsou provázeny zvýšením teploty uvnitř dielektrika.

V dielektriku působí několik druhů ztrát, které jsou rozdílné svým fyzikálním základem. Tyto ztráty se navzájem sčítají. Z hlediska fyzikální podstaty se ztráty v dielektriku rozdělují na **vodivostní ztráty** (u všech dielektrik, podmíněny vnitřní a povrchovou vodivostí), **ztráty polarizační** (kmitočtové a teplotní charakteristiky ztrát vycházejí z druhu polarizace v dielektriku) a **ionizační ztráty** (vyskytují se u plynů a u tuhých a kapalných dielektrik, které plyny obsahují). [1]

Velikosti dielektrických ztrát vyjadřují tyto veličiny:

- ztrátový úhel	δ	[°]
- ztrátový činitel	$\text{tg } \delta$	[-]
- ztrátové číslo	ε''	[-]
- měrné dielektrické ztráty	p	[W.kg ⁻¹]

Ztrátové číslo lze odvodit jako

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \text{tg } \delta. \quad (1.5)$$

Měrné dielektrické ztráty chápeme jako ztrátový výkon P_z [W] vztažený na jednotku objemu látky.

1.2 Komplexní permitivita

Důležitou veličinou je komplexní permitivita. Ta se definuje pomocí tří základních vztahů:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.6)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.7)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' \cdot (1 - j \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (1.8)$$

Kmitočtovou závislost komplexní permitivity odvodil Debye [3] ve tvaru:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega \cdot \tau}, \quad (1.9)$$

kde τ [s] je relaxační doba, ε_∞ [-] je optická permitivita, ε_s [-] je statická permitivita a ω [rad.s⁻¹] je kruhový kmitočet.

Rozkladem Debyeho rovnice pro komplexní permitivitu na reálnou a imaginární složku se získají vztahy pro relativní permitivitu ε' a ztrátové číslo ε'' ve tvaru:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (1.10)$$

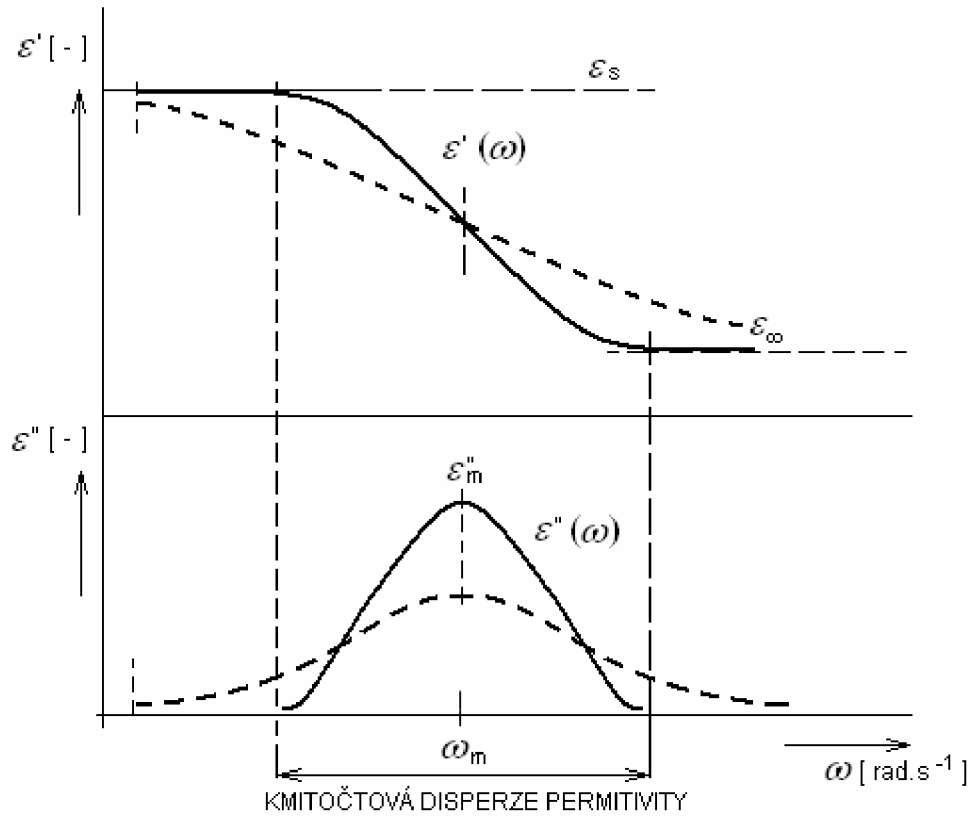
$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}. \quad (1.11)$$

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ [-] lze vyjádřit jako poměr ztrátového čísla a relativní permitivity. Po úpravě rovnic (1.10) a (1.11) vyjde:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \cdot \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (1.12)$$

Grafické závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla na kmitočtu, odpovídající vztahům (1.10) a (1.11), jsou uvedeny na obr. 1.2 plnými čarami. Závislost $\varepsilon' = f(\omega)$ plynule klesá z maximální hodnoty ε_s na nejnižší hodnotu ε_∞ . Křivka $\varepsilon'' = f(\omega)$ prochází maximem při kmitočtu ω_m , kdy $\varepsilon'(\omega)$ prochází inflexním bodem svého průběhu. Dielektrické ztráty se zmenšují při kmitočtech jdoucích k nule, stejně tak při vyšších kmitočtech. V případě dipólových látek je tento proces dán tím, že

elektrické dipóly v polarizovaném dielektriku již nestačí sledovat změny působícího elektrického pole, vektor polarizace klesá a tím klesají i dielektrické ztráty. Oblast, kde relativní permitivita klesá s kmitočtem, se nazývá oblastí kmitočtové disperze. Maximum ztrátového čísla ε''_m nastane při kruhovém kmitočtu $\omega = \omega_m$.



Obr. 1.2 Kmitočtová závislost složek komplexní permitivity

Úpravou Debyeho rovnic (1.10) a (1.11) a vyloučením členu $\omega \cdot \tau$, se získá rovnice kružnice ve tvaru

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right)^2, \quad (1.13),$$

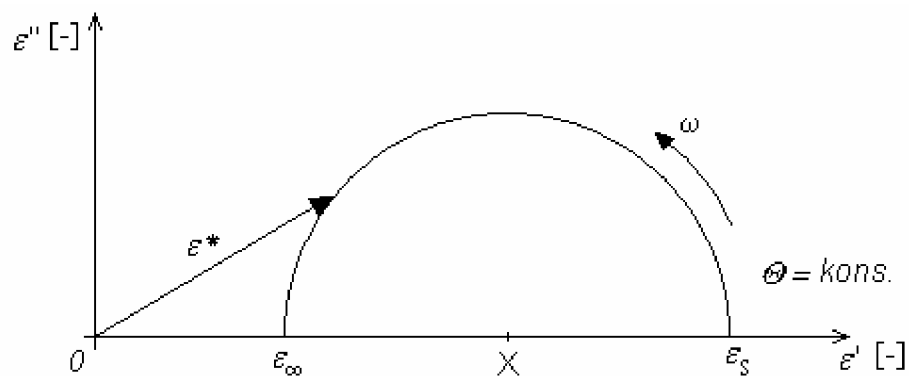
jenž má střed X se souřadnicemi:

$$X = \left[\left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right); 0 \right] \quad (1.14)$$

a poloměr r :

$$r = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2} \right). \quad (1.15)$$

Grafické znázornění rovnice (1.13), je uvedeno na obr. 1.3 a nazývá se, podle autorů, Coleho–Coleho kruhovým diagramem[1]. Znázorňuje kmitočtovou závislost komplexní permitivity ve tvaru $\epsilon^* = f(\omega)$ při konstantní teplotě. Vynesením hodnot ϵ' a ϵ'' do komplexní roviny opisují hodnoty ϵ^* kruhový oblouk, který protíná reálnou osu ϵ' v bodech ϵ_∞ a ϵ_s .

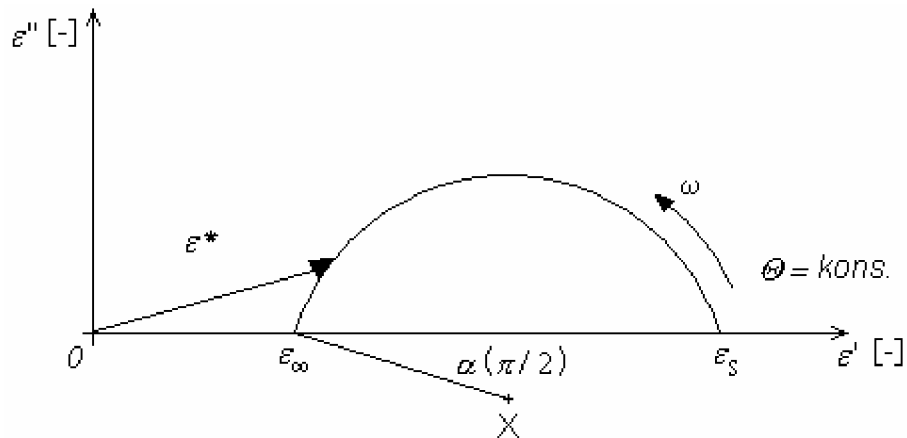


Obr. 1.3 Coleho–Coleho kruhový diagram Debyova průběhu

Na obr. 1.2 jsou znázorněny závislosti $\epsilon' = f(\omega)$ a $\epsilon'' = f(\omega)$ také čárkovanými čarami, které odpovídají křivkám při distribuci relaxačních časů. Pro tyto křivky ϵ' a ϵ'' platí vztah (1.16):

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (1.16)$$

I pro distribuované relaxační časy lze sestavit Coleho–Coleho kruhový diagram. Takový diagram má posunutý střed kruhu pod vodorovnou osu. Posunutí osy závisí na činiteli α [-], vyjadřujícím rozložení relaxačních časů. Coleho–Coleho kruhový diagram s distribucí relaxačních časů je znázorněn na obr. 1.4:

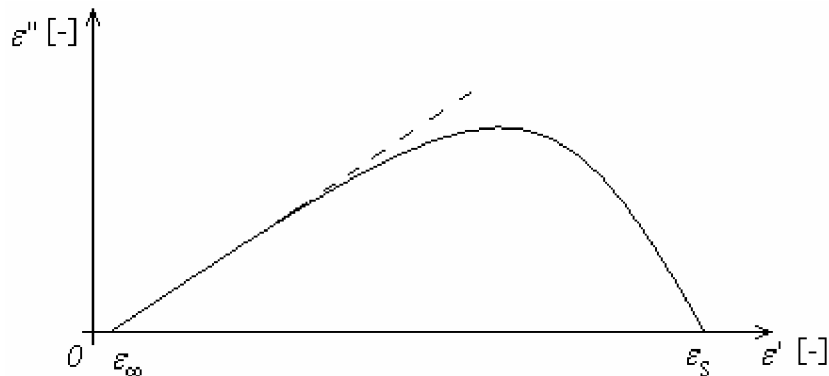


Obr. 1.4 Coleho–Coleho kruhový diagram s distribucí relaxačních časů

S dalším vyjádřením komplexní permitivity přišel Cole spolu s Davidsonem [2]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{(1 + j \cdot \omega \cdot \tau)^\gamma}, \quad (1.17)$$

kde platí pro parametr $\gamma \in (0,1)$. Charakteristika této rovnice je znázorněna na obr. 1.5, kde je patrná odlišnost pro vyšší kmitočty.

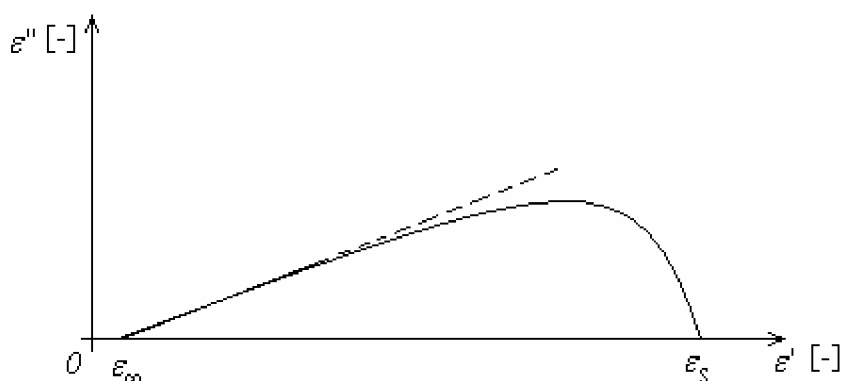


Obr. 1.5 Davidsonův–Coleův diagram s jedním distribučním parametrem

Další úpravu vztahu pro vyjádření komplexní permitivity, která je vyhovující především pro látky se složitou strukturou, navrhli Havriliak a Negami [2] například pro polymery. Jejich vztah (1.18) pak popisuje graf na obr. 1.6, který značně napodobuje průběhy získané měření.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + (j \cdot \omega \cdot \tau)^{1-\lambda})^\beta} \quad (1.18)$$

Zde λ [-] je parametr charakterizující šířku relaxačního spektra $\lambda \in (0,1)$ a β [-] je parametr, který charakterizuje asymetrii disperzní křivky $\beta \in (0,1)$.



Obr. 1.6 Havrilikův–Negamiho diagram se dvěma distribučními parametry

1.3 Navlhavost látek

Povrchová elektrická vodivost (viz kapitola 1.1.2) tuhých izolantů je podmíněna zejména vlhkostí adsorbovanou na jejich povrchu. Z toho vyplývá, že povrchová elektrická vodivost izolantu je úzce spjata s relativní vlhkostí okolí a zároveň je silně ovlivňována strukturou izolantu.

1.3.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu, nebo-li vlhkost okolního prostředí, má velký vliv na navlhavost látek. Množství vodních par v prostředí, kterému je izolant vystaven, vyjadřují absolutní a relativní vlhkost vzduchu.

Absolutní vlhkost ϕ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je definována jako hmotnost vodní páry m [kg] obsažené v jednotce objemu. Je silně závislá na teplotě. Maximální absolutní vlhkost vzduchu ϕ_{\max} [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je stav, kdy je za určité teploty vzduch nasycen vodními parami. Větší vlhkost už není možná, protože by se srážela jako rosa.

Relativní vlhkost φ [%] je definována jako poměr absolutní vlhkosti vzduchu k absolutní vlhkosti vzduchu s nasycenými vodními parami při stejné teplotě a tlaku.

$$\varphi = \frac{\phi}{\phi_{\max}} \cdot 100 \quad (1.19)$$

Relativní vlhkost suchého vzduchu je pod 50 %. Mezi 70 % a 85 % se jedná o normální vlhký vzduch a nad 90 % jde o vlhký vzduch.

1.3.2 Vlastní navlhavost látek

Navlhavost látek, čili hygroskopičnost, je schopnost přijímat vlhkost z okolního prostředí. Jde tedy o adsorpci molekul vody na povrchu látky. Při adsorpci se uplatňují elektrostatické síly (u látek hydrofilních), van der Waalsovy síly [4] a chemické síly. Molekula vody setrvává na povrchu látky po dobu τ_v [s], kterou vyjadřuje rovnice (1.20). Po uplynutí této doby, která je silně závislá na teplotě, se molekula desorbuje.

$$\tau_v = A \cdot \exp\left(\frac{W}{k \cdot \Theta}\right) \quad (1.20)$$

Doba setrvání molekuly vody na povrchu látky je též závislá na vazební energii W [J], A [s] je materiálová konstanta a k [J.K⁻¹] je Boltzmanova konstanta.

Pokud látku umístíme do prostředí s vyšší stálou relativní vlhkostí a stálou teplotou, zvýší se postupně počáteční malý obsah vlhkosti v jednotce objemu látky a přiblíží se k rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá relativní vlhkosti prostředí. Tento dlouhodobý jev se nazývá navlhání. Naopak pokud je látka umístěna do stálého prostředí s nižší relativní vlhkostí, dochází k vysoušení látky.

Míru navlhnutí látky pak určíme množstvím vody, která je obsažena v objemu látky po procesu navlhání:

$$\psi = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (1.21)$$

kde ψ [%] je navlhavost, m [kg] je hmotnost navlhle látky a m_0 [kg] je hmotnost dokonale vysušené látky. [4]

1.4 Stárnutí dielektrických materiálů

1.4.1 Teorie stárnutí

Stárnutí, které je definováno vzrůstajícím znehodnocením dielektrických materiálů, trvale zhoršuje jejich účelové vlastnosti působením fyzikálních a chemických přeměn v závislosti na čase. K tomuto jevu dochází prostřednictvím vlivů a podmínek, kterým je dielektrikum vystaveno. Stárnutí se však výrazněji uplatňuje u látek organických. U látek anorganických se až na výjimky neprojevuje.

Doba života izolačního systému podstatně závisí na vlastnostech dielektrických materiálů. To úzce souvisí i se stárnutím. Doba života izolačního systému a potažmo i doba života elektrického zařízení, je doba, kdy je systém či zařízení schopno konat normální činnost. Tedy činnost, pro kterou bylo vyrobeno a využíváno. Po uplynutí této doby života zestárne materiál v takovém rozsahu, že není schopný dále zastávat požadované funkce.

Stárnutím podmíněné změny vlastností izolantů se dělí na změny vratné a nevratné. Vratné, tedy dočasné, změny odezní hned tehdy, přestanou-li působit vnější vlivy, které změnu vyvolaly. Materiál pak po čase získá původní vlastnosti. Vratné změny jsou fyzikálního charakteru. Nevratné (trvalé) změny jsou důsledkem komplikovaných chemicko-fyzikálních dějů. Změny jsou strukturálního charakteru a vlastnosti materiálů se trvale zhorší. Změny nemusí nutně nastat v celém materiálu, ale mohou být pouze povrchového rázu. Potom se hovoří o korozi materiálu. Faktorů, které způsobují přeměnu dielektrických a izolačních materiálů je několik. Zpravidla jich však působí několik současně.

Faktory způsobující degradaci dielektrik:

- teplota
- vzdušný kyslík
- mechanická namáhání
- elektrické pole
- klimatické vlivy
- chemické vlivy
- ultrafialové záření
- aj.

Tepelné stárnutí organických izolantů je nejčastějším případem stárnutí. Ostatní faktory pouze dopomáhají k destrukci, způsobené tepelným namáháním. U izolantů používaných ve vysokonapěťové technice se uplatňuje i vliv elektrického pole. Nevratné změny, které při tepelném stárnutí probíhají, jsou podmíněny sérií chemických reakcí (oxidace, polymerace a polykondenzace, depolymerace a rozklad některých komponent materiálu). Tyto procesy se dějí při všech teplotách, i při pokojové teplotě, ale s rostoucí teplotou se tyto procesy urychlují. Nicméně pro rychlost stárnutí není rozhodující kvantum dodané tepelné energie, ale úroveň teploty.

U velké skupiny dielektrických materiálů má přednostně vliv pomalá oxidace vzdušným kyslíkem. Jeho efekt záleží na druhu materiálu, přístupu kyslíku k izolantu a na teplotě. Oxidace má za následek strukturální změny i vznik polárních zplodin. Ty zvyšují elektrickou vodivost a ztrátový činitel. U organických polymerů se vlivem oxidace trhají makromolekulární vazby, to má za následek pokles mechanické pevnosti a často i zhoršení elektrických vlastností. S rostoucí teplotou vzrůstá stupeň oxidace těchto polymerů.

- **Polymerace** (případně polykondenzace) se vyskytuje za přítomnosti volných funkčních skupin a vznikem trojrozměrných zesíťovaných struktur (vzniká i oxidací). Stárnutí je doprovázeno úbytkem množství změkčovadel v syntetických látkách, látka tvrdne, později křehne, ztrácí pružnost, zhoršují se její elektrické vlastnosti, roste navlhavost, apod.
- **Depolymerace** je při zvýšených teplotách doprovázena rozkladem makromolekul. Vyskytuje se u všech polymerních látek včetně buničiny, a to i bez přístupu kyslíku. Je charakteristickým faktorem při vyšších teplotách.

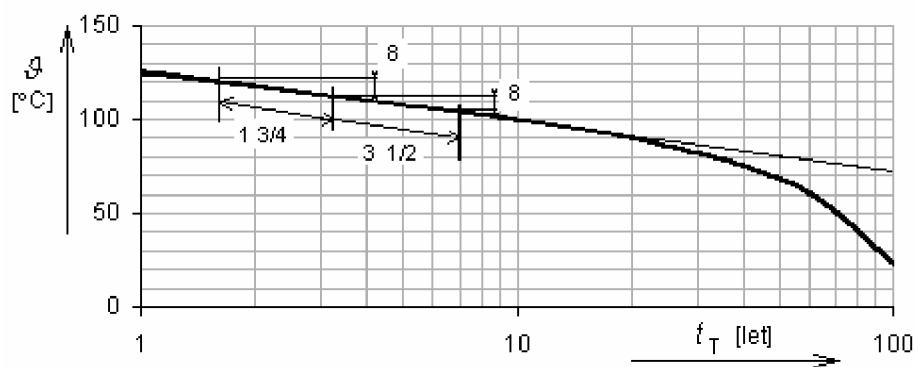
1.4.2 Tepelné namáhání

Jeden z prvních pokusů o číselné vyjádření účinků tepelného stárnutí a o algebraické vyjádření závislosti stárnutí na čase provedl Montsinger [4]. Ten studoval dobu života t_T papírové izolace vodičů v olejových transformátorech. Měřil úbytek mechanické pevnosti papíru v závislosti na konstantní teplotě. Na základě svých výsledků pak stanovil rovnici (1.22)

$$t_T = t_{T0} \cdot \exp[-M \cdot \vartheta_T], \quad (1.22)$$

kde t_T [hodin nebo roků] je doba života izolace, M [h] a t_{T0} [hodin nebo roků] jsou materiálové konstanty určeny experimentálně (t_{T0} je doba života t_T při teplotě $\vartheta = 0$ C) a ϑ_T [°C] je trvalá teplota stárnutí.

Montsinger experimentálně zjistil, že doba života t_T izolace klesne při navýšení teploty o $\Delta\vartheta = 8$ °C o polovinu a naopak při snížení teploty o $\Delta\vartheta = 8$ °C se doba života prodlouží na $2t_T$. Toto pravidlo je označováno jako Montsingerovo pravidlo osmi stupňů. Grafické znázornění lze vidět na obr. 1.7.



Obr. 1.7: Montsingerovo pravidlo osmi stupňů v závislosti doby života izolace (papír v oleji) na teplotě

Montsingerovo pravidlo osmi stupňů však neplatí všeobecně. Platí jen pro papír v oleji a pro úzký rozsah teplot.

Podrobnější popis tepelného stárnutí izolanů z hlediska chemického procesu je důležitý pro lepší představu o teorii stárnutí. Výraz (1.22) totiž není podložen teoretickým rozбором, avšak při degradaci organických látek stárnutím jde o soubor chemických procesů. Tyto reakce se musí řídit určitým teoretickým postupem, kterému podléhají i všechny ostatní chemické děje.

Zajímavější přístup navrhol Dakin [3] v roce 1948. Podle Dakinovy teorie zvyšuje účinek teploty rychlost chemických reakcí, tedy platí vztah mezi rychlostí degradace a teplotou, a má tentýž tvar jako rovnice rychlosti chemické reakce, známá jako Arrheniova rovnice:

$$R = R' \cdot \exp\left[-\frac{\Delta W_A}{k \cdot \Theta_T}\right], \quad (1.23)$$

kde $R[-]$ rychlostní degradace, $R' [s^{-1}]$ je celkový počet vzájemných srážek reagujících molekul za jednotku času, $\Delta W_A [J]$ je aktivační energie (hlavní) reakce zapojené do procesu, $k [J \cdot K^{-1}]$ je Boltzmanova konstanta a $\Theta_T [K]$ je teplota stárnutí. Tepelná životnost je dána:

$$t_T = \frac{C}{R} = A \cdot \exp\left[\frac{B}{\Theta_T}\right], \quad (1.24)$$

$$A = \frac{C}{R'}, \quad (1.25)$$

$$B = \frac{\Delta W_A}{k} \quad (1.26)$$

kde t_T [hodin nebo roků] je doba života, $\Delta W_A [J]$ je aktivační energie, $k [J \cdot K^{-1}]$ je Boltzmanova konstanta a $\Theta_T [K]$ je teplota stárnutí.

Rovnice (1.24) je známá jako Arrheniův vztah a je obvykle představována v takzvaném Arrheniově diagramu v semilogaritmických souřadnicích. Vzniká zde přímka s lineárním sklonem B (viz (1.26)). To umožní extrapolaci od testované do pracovní teploty. Mezinárodními standardy byla ustanovena tepelná odolnost součinitele izolace, použitými ukazateli TI (teplotní index, teplota odpovídající době života 20 000 h) a HIC (půlčí interval v °C, tepelný rozdíl způsobující snížení doby života na polovinu, odchylojící se od teploty TI).

Ve skutečnosti však často přímku v tepelném diagramu nezískáme. Navíc, rovnice (1.24) může být považována za přibližnou na základě Eyringovy aproximace, dle které je interpretace této rovnice funkcí teploty Θ . Nicméně exponenty odhadem získané z Arrheniových nebo Eyringových modelů jsou zpravidla téměř shodné. Z toho důvodu rovnice (1.24) zůstává základem pro každou tepelnou zkoušku a Arrheniův diagram je obvykle užíván v praxi výzkumníky a inženýry. [3]

Degradace materiálu je soubor chemických reakcí. Stupeň chemické reakce je podmíněn koncentrací $c [mol \cdot dm^{-3}]$ všech reagujících složek na teplotě:

$$\frac{dc}{dt} = -\kappa \cdot c^i, \quad (1.27)$$

kde $\kappa[-]$ je rychlostní konstanta a $i[-]$ je exponent ($i = 1, 2, 3$, nejčastěji je $i = 1$ což platí pro většinu organických izolantů).

Protože stárnutí organických materiálů je soubor chemických reakcí, které látku degradují a tím zhoršují její fyzikální vlastnosti, je patrné, že rychlost chemické reakce odpovídá rychlosti stárnutí. Potom je rychlostní konstanta κ úměrná době, za kterou v izolantu proběhly všechny procesy, způsobující jeho znehodnocení. Z této úvahy dospěl Büssing [4] k vyjádření životnostního zákona:

$$t_T = B \cdot \exp\left[\frac{b}{\Theta_T}\right], \quad (1.28)$$

kde t_T [hodin nebo let] je doba života izolace, $b[\text{K}^{-1}]$ a B [hodin nebo let] jsou materiálové konstanty a Θ_T [K] je teplota stárnutí.

Rovnice (1.28) je také označována jako Büssingův teorém. Oproti Montsingerově rovnici (1.22) v ní lze konstanty b a B stanovit výpočtem. Büssingův teorém se stal základem pro hledání doby životnosti velkého množství organických izolantů.

Důležitými zdroji informací o izolačním materiálu jsou čáry života a čáry stárnutí izolace. Čára života je závislost doby života na teplotě, v níž materiál plní svou funkci, nebo na teplotě, v níž je skladován. Čáry stárnutí jsou grafickým znázorněním průběhu hodnot sledovaného znaku v závislosti na čase. Stálá teplota je zde parametrem.

1.4.3 Elektrické namáhání

Pro elektrické (nebo-li napěťové) namáhání byly první modely vyvíjeny v sedmdesátých letech dvacátého století. Ten základní uvádí rovnice (1.29) a je založen na nepřímém mocninném vztahu. V anglické literatuře bývá označován IPM (Inverse Power Model).

$$t_E = C_1 \cdot E^{-g} \quad (1.29)$$

Někdy se též IPM uvádí v exponenciálním tvaru při použití jiných koeficientů:

$$t_E = C_E \cdot \exp[-h \cdot E'], \quad (1.30)$$

kde t_E [hodin nebo roků] je doba života při elektrickém namáhání, C_E [m.h.V⁻¹], g [-] je konstanta závislá na teplotě a jiných ovlivňujících faktorech, h [m.V⁻¹] je činitel elektrické odolnosti, tzn. schopnosti odolávat elektrickému namáhání a E' [V.m⁻¹] je velikost působícího elektrického pole. Grafickou formulací rovnic (1.29) a (1.30) jsou čáry života, přičemž oba tyto modely jsou využívány pro zkoušky, kdy je namáhání realizováno konstantním působením elektrického pole.

Exponenciální tvar rovnice dále Dakin použil k popisu doby života, kdy je porucha způsobena povrchovými výboji. Kromě toho studoval směrnice čar života, přičemž zjistil, že pokud má čára života malou směrnici vůči horizontále, je doba do první poruchy o mnoho větší, než udává právě rovnice (1.30). Proto několika úpravami dospěl k formulaci rovnice:

$$t_E = C_E \cdot \frac{\exp[-h \cdot E']}{E' - E_0}. \quad (1.31)$$

Modifikací přejde rovnice (1.31) do tvaru:

$$\frac{t_E}{t_{E0}} = \left(\frac{E' - E_t}{E_t - E_0} \right)^{-g}, \quad (1.32)$$

kde E_t [V.m⁻¹] je prahová hodnota elektrického namáhání, t_{E0} [hodin nebo roků] značí dobu života pro $E' = E_0$ a E_0 [V.m⁻¹] je namáhání, kdy může být vliv elektrického pole zanedbán v důsledku jiného faktoru stárnutí. Nové pojetí prahové hranice stárnutí bylo předloženo jako matematicky neurčitelná doba života, která odpovídá extrémně dlouhé době života při působení malých elektrických polí. Pokud se izolace nachází pod prahovou hodnotou, je zabezpečena vysoká spolehlivost.

Prahová hodnota stárnutí je též potřebná pro změnu statistického rámce životnostních modelů s ohledem na velmi krátké doby života některých materiálů. Tento postup spojuje životnostní modely s váhou η [hodin nebo roků], tedy s významem parametru Weibullyho funkce:

$$f(t, E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t_E}{\eta}\right)^{\hbar}\right], \quad (1.33)$$

kde \hbar [-] je tvarový parametr a t_E [hodin nebo roků] je doba života při elektrickém namáhání. Důkaz vychází z experimentálního měření mezního namáhání na neparametrických modelech při velmi dlouhých časech. Projevuje se stoupajícím nebo klesajícím zakřivením čar života, které jsou kresleny v logaritmických nebo semilogaritmických souřadnicích.

1.4.4 Kombinované namáhání

Problém tepelně-elektrického modelování doby života byl intenzivně zkoumán v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století. Byly zkoumány dva přístupy, jeden vycházel z Eyringova zákona a druhý ze vzájemného skládání tepelných a elektrických modelů. Instrukce pro skládání kombinovaného, čili tepelně-elektrického životnostního modelu je objasněno přes závislost parametrického modelu elektrického a tepelného namáhání.

Dalším způsobem získání kombinovaného životnostního modelu je elektrický životnostní model sloužící jako základ pro analýzu souboru dat, jenž pochází ze zkoušek životnosti materiálu provedených za dané teploty a s různými úrovněmi elektrického pole nebo naopak. H. S. Endicott [3] vysvětlil vztah tepelného a elektrického modelu z teplotní reakce rychlosti změny parametru jako funkci elektrického namáhání (stejný přístup jako u mechanického namáhání), přepsáním na Eyringovu [3] rovnici jako

$$R(E', \Theta) = k_1 \cdot \Theta^{\pi} \cdot \exp\left[-\frac{B}{\Theta}\right] \cdot \exp\left[\left(k_2 + \frac{k_3}{\Theta}\right) \cdot f(S)\right], \quad (1.34)$$

kde S [-] je obecně namáhání (elektrické nebo mechanické), k_1 [-], k_2 [-], k_3 [-] jsou konstanty závislé na čase, teplotě či namáhání, exponent $\pi \approx 1$. Pokud $f(S) = 0$, rovnice (1.34) přechází v rovnici tepelného života ve formě výše uvedené Arrheniovy rovnice pro tepelné namáhání (1.24).

Pokud $\Theta \approx 273,15$; tedy $S = E'$, pak se jedná o čistě elektrické namáhání. Rovnice (1.34) pak přejde do tvaru:

$$R(E') = C' \exp[h \cdot f(E')], \quad (1.35)$$

kde $h = k_2 + (k_3 / \Theta)$ a $C' = k_1 \Theta^\tau \exp[-B / \Theta]$. Potom platí že $R(E')$ se rovná době života při elektrickém namáhání. Základní vztahy pro životnost elektrické izolace jsou funkcí teploty nebo elektrického namáhání (znázorněno v rovnici (1.34)). Z toho vyplývá přímá úměra těchto rovnic v kombinovaném modelu namáhání. Přepsáním rovnice (1.34) získal Simoni [3] první rovnici s řádnými okrajovými podmínkami

$$t_K = t_0 \cdot \exp[-O \cdot T_T - h \cdot E' + b \cdot E' T_T], \quad (1.36)$$

kde t_K [hodin nebo roků] je doba života při kombinovaném namáhání, t_0 [hodin nebo roků] je doba života bez účinku namáhání, O [K] a h [m.V⁻¹] jsou materiálové konstanty, E' [V.m⁻¹] je elektrické namáhání, stanovené z rovnice $E - E_0$, nebo z logaritmu $\log(E/E_0)$, podle zvoleného elektrického modelu, tedy exponenciálního nebo inverzního mocinného. T_T [K⁻¹] je takové tepelné namáhání, kdy jej můžeme definovat jako

$$T_T = \frac{1}{\Theta_0} - \frac{1}{\Theta}, \quad (1.37)$$

přičemž Θ_0 [K] je teplota pod kterou může být tepelné stárnutí zanedbáno. Při pokojové teplotě je toto pokládáno jen za pravidlo. Z rovnice (1.36) vyplývají charakteristické koeficienty pro elektrickou izolaci: O a h pro tepelnou a elektrickou odolnost, b pro rozsah kombinovaného namáhání a t_0 představuje váhu parametru.

Tento model byl přizpůsoben pro několik různých materiálů. Objevení existence prahové oblasti a následné modifikace elektrického životnostního modelu znamenalo nutnou změnu v modelu kombinovaného namáhání takovým způsobem, že se čára života kloní k horizontále, zatímco namáhání směřuje k prahové hodnotě. Sklon k nekonečné době života při elektrickém namáhání a při běžné teplotě okolí vykazuje existenci prahové teploty, která není nižší než běžná teplota okolí. Pak model kombinovaného namáhání (1.36) musí být změněn zavedením jmenovatele D jdoucího k nule, který je znázorněn v rovnici (1.38). V tomto případě jde namáhání k prahové hodnotě.

$$D = \frac{S}{S'} - 1. \quad (1.38)$$

Zde $S[-]$ je všeobecné namáhání (v našem případě tepelné nebo elektrické) a $S'[-]$ je prahová hodnota tohoto namáhání. Rovnice (1.36) pak po několika úpravách nabývá tvaru:

$$t_k = \frac{t_0 \exp[-O \cdot T_T - h \cdot E' + b \cdot E' \cdot T_T]}{\frac{T_T}{T'_T} + \frac{E'}{E'_T} - k_c \frac{T_T}{T'_T} \frac{E'}{E'_T} - 1}, \quad (1.39)$$

kde $T'_T [K^{-1}]$ je prahová hodnota T_T pro $E'=0$ a $E'_t [V \cdot m^{-1}]$ je prahová hodnota E' pro $T_T \approx 273,15$, $k_c[-]$ je koeficient ovlivňující tvar rovnoběžných čar, tedy konstantních čar života, jenž jsou získané z životnostního modelu, který odpovídá hodnotám E' a T_T . Rovnice (1.39) platí pro materiály, u kterých lze pozorovat prahové hodnoty, zatímco (1.36) platí pro materiály, které tyto prahové hodnoty nevykazují. [3]

1.5 Složené materiály

V oblasti elektrotechniky se stále častěji používají nové materiály, které jsou tvořeny ze dvou či více směsných materiálů různého chemického složení, jejichž geometrické útvary jsou spojeny v celém objemu materiálu. Tyto materiály jsou označovány jako složené, směsné.

1.5.1 Vlastnosti složených materiálů

Vlastnosti složených materiálů jsou prioritně závislé na vlastnostech použitých surovin, avšak výrazně závisí na množství složek, geometrickém tvaru a orientaci částic složek, uspořádání a rozložení v soustavě.

Složené materiály jsou tříděny podle několika odlišných aspektů, a to z hlediska uspořádání jednotlivých složek v soustavě, z hlediska geometrického tvaru částic, z hlediska směrovosti vlastní soustavy a mechanismu zpevnění soustavy.

Z hlediska uspořádání se složené materiály dělí na **matriční** a **statistické** složené soustavy.

Je-li brán zřetel na geometrický tvar částic tvořící složenou soustavu, rozdělujeme složené materiály podle následujícího klíče:

- 1) vrstevnaté složené materiály
- 2) složené materiály s vláknitými plnivý
- 3) složené materiály plněné částicemi.

V otázce směrovosti směsných soustav je potřeba tuto směrovost zvýraznit, nebo naopak potlačit, a to podle okolností. To se řeší volbou soustavy, materiálu a orientací částic soustavy. Proto jsou složené materiály děleny na materiály s izotropními a anizotropními vlastnostmi. [4]

1.5.2 Permittivita složených soustav

Permittivitu složené soustavy lze vypočítat pomocí několika vztahů. Jeden z přístupů vyplývá z Maxwellova [4] směsného vztahu, který je znázorněn v rovnici (1.40).

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_2'} = 3V_1 \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'} \quad (1.40)$$

ε_s [-] je relativní permittivita složené soustavy, ε_1' [-] je relativní permittivita první složky s objemovým dílem v_1 [-], ε_2' [-] je relativní permittivita druhé složky.

V praxi se nejčastěji využívá Lichteneckerova [4] mocninného vztahu (1.41), který lze pro dvousložkovou soustavu upravit na vztah (1.42).

$$\varepsilon^l = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \varepsilon_i^l \quad (1.41)$$

$$\varepsilon^l = v_1 \cdot \varepsilon_1^l + v_2 \cdot \varepsilon_2^l \quad (1.42)$$

Parametr l [-] závisí na tvaru a orientaci částic složené soustavy, přičemž $l \in \langle -1; 1 \rangle$.

Pro hodnotu $l=0$ pak tento vztah přepisujeme do Lichteneckerova logaritmického vztahu (1.43).

$$\log \varepsilon_s^l = v_1 \cdot \log \varepsilon_1^l + v_2 \cdot \log \varepsilon_2^l \quad (1.43)$$

2 Experimentální část

2.1 Zkušební vzorky

2.1.1 Vlastnosti zkušebních vzorků

Předmětem experimentálního zkoumání jsou vzorky materiálu ISONOM[®] NMN 0881. Tento materiál je vyráběn firmou ISOVOLTA[®], která jej produkuje v několika modifikacích a řadí se mezi vícesložkové flexibilní izolační materiály.

Složení - ISONOM[®] NMN se skládá z polyesterové fólie PETF, pokryté po obou stranách vnější vrstvou papíru NOMEX[®].

Vlastnosti - ISONOM[®] NMN je kompozitní izolační materiál, spadající do teplotní třídy 155 (F) s výbornými mechanickými vlastnostmi, jako jsou vysoká pevnost v tahu a odolnost proti přetržení, kombinovaná s vysokou elektrickou pevností. ISONOM[®] NMN má několik různých modifikací. U typů 0881, 0883 a 2045 je ochranný materiál NOMEX[®] uložen po obou stranách a typ 2035 je pouze jednostranný.

Použití - ISONOM[®] NMN se používá hlavně jako vložka drážek, uzávěr drážek a fázová izolace při výrobě tepelně přetěžovaných nízkonapěťových motorů. Kromě toho je ISONOM[®] NMN užíván jako mezivrstevová izolace v transformátorech a dalších elektrických strojích a přístrojích.

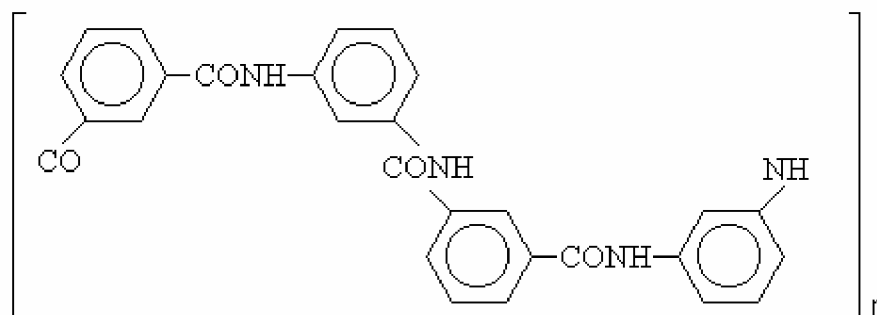
Podmínky skladování - ISONOM[®] NMN může být skladován neomezeně dlouho za normálních podmínek, tedy při 20 °C a 50% relativní vlhkosti.[6]

Tab. 2.1: Technická data pro materiál ISONOM[®] NMN typu 0881

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

2.1.2 Jednotlivé složky zkušební vzorku

NOMEX[®], vyráběný firmou DuPont[™], je vysoce tepelně odolný materiál. Jedná se o syntetický aromatický polyamid. Strukturální vzorec je naznačen na obr. 2.1



Obr. 2.1 Strukturální vzorec aramidu

Částičky aramidu se do podoby papíru zpracovávají běžnými papírenskými technologiemi, materiál pak je zpevňován kalandrováním při vysokých teplotách.

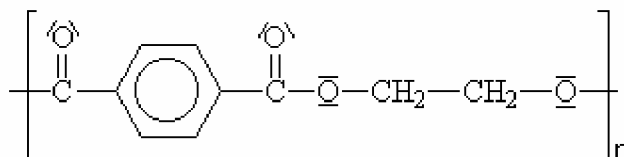
Má výborné elektrické vlastnosti – elektrická pevnost $E_p = 40 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, relativní permitivita $\epsilon_r = 2,5$, vnitřní rezistivita $\rho_v = 10^{16} \Omega\cdot\text{m}$. Dále se vyznačuje vysokou pevností v tahu a s tím související odolnost proti natržení. Je nehořlavý a samozhášivý, působením tepla netaje. Odolává teplotám až do $220 \text{ }^\circ\text{C}$.

Aromatický polyamid je polymerní látka, která díky své dlouhé molekule a chemickému složení makromolekul odolává chemikáliím, rozpouštědlům a záření. Snáší se se všemi druhy laků a pryskyřic, které se používají v elektrotechnice, minerálními i syntetickými oleji používanými v transformátorech. Často chrání jiné materiály před hydrolytickými vlivy.

NOMEX[®] se používá tam, kde je potřeba ochrany proti nebezpečným účinkům vysoké teploty. V elektrotechnice se používá zejména pro drážkové izolace a izolace fází.

Polyethyltereftalát (PETF) se řadí mezi syntetické makromolekulární látky neboli polymery. Jsou to látky o vysoké molekulové hmotnosti. PETF je polymer, vznikající polykondenzací. Polykondenzace je reakce, při které reagují dva stejné nebo různé monomery, obsahující dvě nebo více reakčních funkčních skupin. [2]

Jde tedy o lineární polyester, zařazený mezi polykondenzační termoplasty. Vyznačuje se stálostí rozměrů, nízkým smykovým odporem, vysokou pevností a tuhostí. Krátkodobá teplotní mez (20 – 30 min.) polyethyltereftalátu je 170 °C, dlouhodobá teplotní mez (např. 100 dní) pak 110 °C. Teplota tavení je 250 – 265 °C. PETF vzniká kondenzací dimethyltereftalátu s ethylenglykolem. Strukturální vzorec PETF je uveden na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Strukturální vzorec polyethyltereftalátu

2.2 Použité zařízení

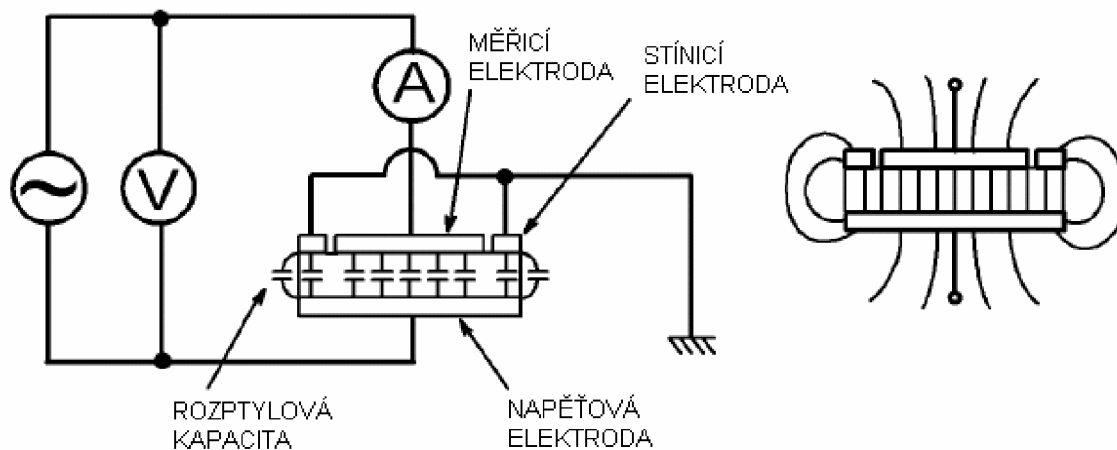
2.2.1 Měřicí přístroje

K měření v kmitočtové oblasti byly použity přístroje firmy Hewlett Packard a to Agilent 4284A a Agilent E4980A. Jedná se o přesné RLC-metry s kmitočtovým rozsahem 20 Hz až 1 MHz, respektive 20 Hz až 2 MHz. Přístroje pracují na principu mostové metody s automatickým vyvažováním. Měřicí přístroj Agilent 4284A používá sběrnici HP-IB pro komunikaci s počítačem prostřednictvím PCI karty, zatímco Agilent E4980A je s PC stanicí spojen pomocí USB sběrnice. Oba přístroje obsluhuje program VEE. Jako výstup naměřených hodnot kapacity a ztrátového činitele je použit soubor tabulkového procesoru Microsoft Excel.

Aby se zabránilo vzniku chyb během měření, bylo nutné před každým měřením provést korekce. V případě měření kapacity a ztrátového činitele se jedná o chyby způsobené délkou a vlastnostmi přívodního kabelu. Přístroje jsou vybaveny funkcemi pro měření korekcí OPEN, SHORT a LOAD, jenž chyby způsobené vodiči potlačují. Korekce OPEN, tedy korekce naprázdno, pomáhá odstranit chybu způsobenou rozptylovou admitancí Y_0 . Korekce SHORT odstraňuje chybu zapříčiněnou délkou kabelu, tedy ztrátovou impedancí Z_S . Korekce LOAD nebyla během měření aplikována, neboť se uplatňuje pro předem nastavené hodnoty kmitočtu. [5]

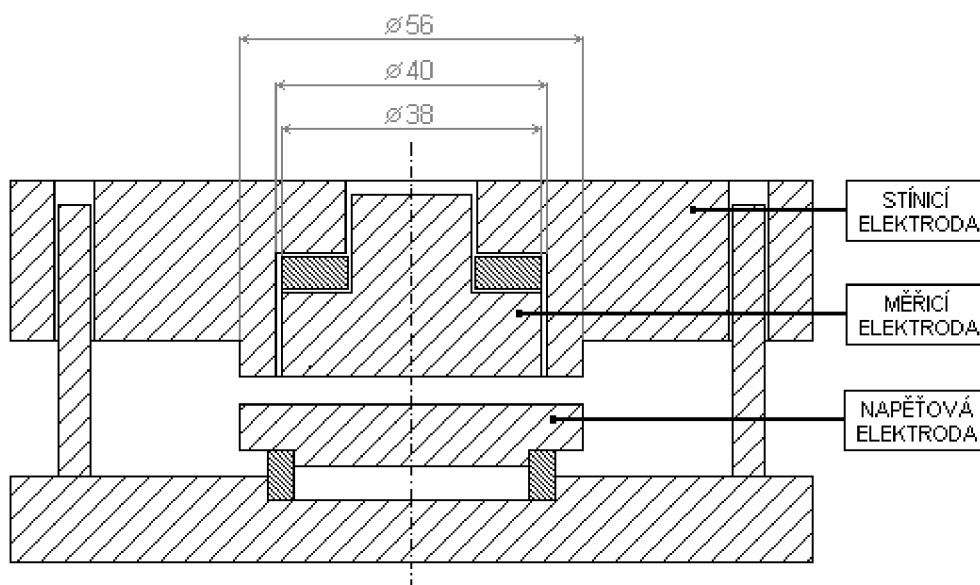
2.2.2 Tříelektrokový měřicí systém

Pro měření vzorků, které byly vystaveny tepelnému namáhání bylo použito tříelektrokového měřicího systému, který byl vyroben na Ústavu elektrotechnologie (UETE) FEKT v Brně. Zapojení je znázorněno na obr. 2.3.



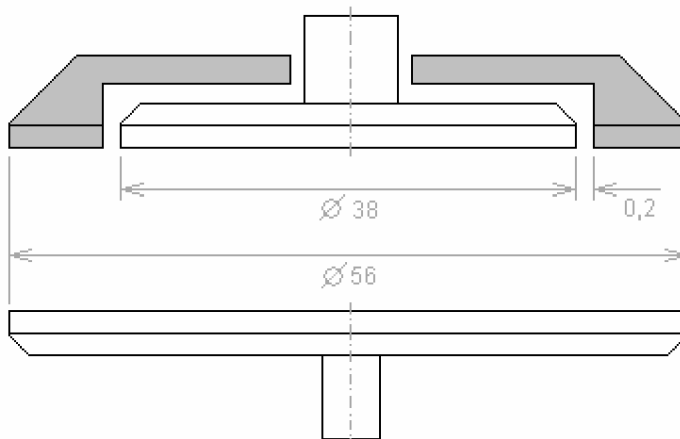
Obr. 2.3 Zapojení tříelektrokového měřicího systému (převzato z [5])

Tříelektrokový měřicí systém se používá při měření na těch materiálech, které mají přibližně stejné vnitřní a povrchové odpory. Tříelektrokový systém odstraňuje vliv povrchového proudu použitím speciální ochranné elektrody, která je nazývána stínící elektrodou. Tato elektroda je připojena na nulový potenciál. Tříelektrokový měřicí systém, který byl použit pro měření tepelného namáhání, je v řezu znázorněn na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Řez použitým tříelektrodivým měřicím systémem [mm]

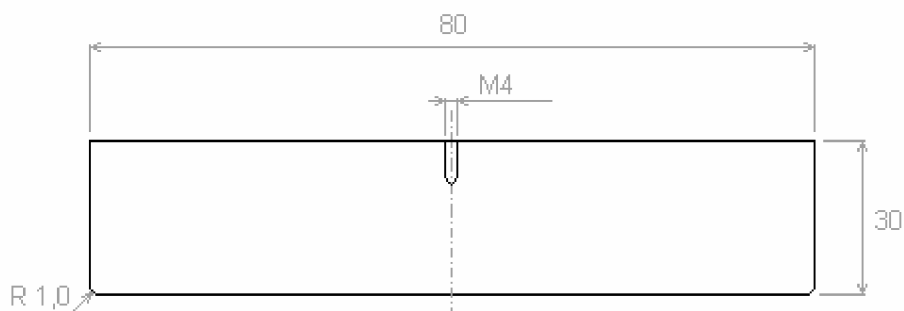
Pro měření vzorků materiálu, které byly vystaveny elektrickému a kombinovanému namáhání, byl použit originální tříelektrodivý systém HP 16451B. Jeho řez je znázorněn na obr. 2.5



Obr. 2.5 Řez tříelektrodivým měřicím systémem HP 16451B [mm]

2.2.3 Dvouelektrodivý systém

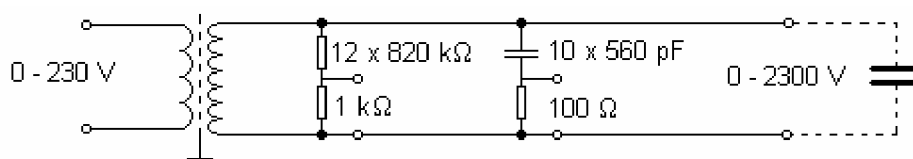
Tento systém byl navržen a vyroben na UETE pro elektrické a kombinované namáhání. Materiál pro tento systém musel odolávat korozi a byly vyžadovány stálé vlastnosti při působení různě vysokých teplot. Elektrody byly proto vyrobeny z oceli DIN 1.4301+1X (X5CrNi18-10) tvářené za tepla. Jedná se o ušlechtilou legovanou nerezovou ocel. Řez těmito elektrodami je znázorněn na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Dvouelektrodivý systém [mm]

2.2.4 Vysokonapětový zdroj

Zdroj vysokého napětí, vyrobený na UETE, byl použit pro realizaci elektrického a kombinovaného namáhání. Skládá se z transformátoru, odporového a kapacitního děliče. Transformátor 230/2300 V se vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu má příkon 1440 VA. Odporový dělič slouží ke sledování výstupního napětí, kapacitní dělič slouží po připojení na osciloskop ke sledování případných přeskoků, výbojů v dutinkách zkoumaného materiálu apod. Schéma zdroje je znázorněno na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Schéma vysokonapětového zdroje

Pro regulaci vstupního napětí vysokonapětového zdroje byl použit zdroj **Diametral AC250K1D**. Jedná se o procesorem řízený zdroj střídavého napětí v rozsahu 0 V až 290 V s krokem 1 V a čistým sinusovým průběhem 50 Hz. Zdroj je napájen síťovým napětím 230 V/ 50 Hz.

2.2.5 Teplotní komora SteriCell 55

Pro realizaci veškerého namáhání byla použita teplotní komora SteriCell 55 od firmy BMT. Komora pracuje v teplotním rozsahu od teploty okolí po 250 °C. Teplota je výrobcem garantována při prostorové odchylce (-1 až +5) °C a časové odchylce (-1 až +3) °C. Rozměry komory jsou: šířka 400 mm, hloubka 390 mm a výška 350 mm.

2.3 Metodika experimentu

Bylo připraveno celkem 20 vzorků materiálu ISONOM[®] NMN 0881 o rozměrech 90 x 90 mm. Vzorky byly označeny a na deseti místech byla proměřena jejich tloušťka. Poté byly na vzorcích změřeny a vypočteny kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla. Dále byly vzorky ponechány po dobu pěti dnů v exsikátoru s nulovou relativní vlhkostí. Tohoto prostředí bylo dosaženo pomocí sorbentu, kterým byly syntetické zeolity (krystalové hydratované alumosilikáty alkalických kovů a kovů alkalických zemin).

Tepelné namáhání pro osm vzorků bylo realizováno v teplotní komoře SteriCell 55. Podle normy [7] byly zvoleny dvě hladiny stárnutí. Pro vzorky J1, J2, J3 a J9 se jednalo o teplotu 175 °C a pro vzorky J4, J5, J6 a J10 o teplotu 195 °C. Vzorky J9 a J10 byly opatřeny napařenými stříbrnými elektrodami pro zjištění vlivu vzduchové mezery na měření. V případě tepelného namáhání byly kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla měřeny na každé hladině stárnutí při teplotě okolí (23 °C) a dále při 60 °C, 110 °C a 150 °C. Po vychladnutí vzorku a elektrodového systému byly znovu změřeny při teplotě okolí.

Elektrické namáhání bylo realizováno pro dva soubory po třech vzorcích pomocí dvouelektrodových systémů. Elektrodové systémy byly taktéž umístěny v komoře SteriCell. Vzorky 1, 2 a 3 byly namáhány napětím 1,5 kV, což znamenalo intenzitu elektrického pole 4,2 kV.mm⁻¹. Vzorky 7, 8 a 9 byly namáhány napětím 2,0 kV což znamenalo intenzitu elektrického pole 5,5 kV.mm⁻¹.

Kombinované namáhání bylo uskutečněno na šesti vzorcích. Teplotě 200 °C a napětí 1,5 kV byly vystaveny vzorky 4, 5 a 6; teplotě 200 °C a napětí 2,0 kV vzorky 10, 11 a 12.

Vzorky byly následně postupně vystaveny prostředím s různou relativní vlhkostí. Vlhkost 33 % byla realizována v exsikátoru pomocí nasyceného roztoku $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ po dobu 48 h. Vlhkost 55 % pomocí nasyceného roztoku $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, taktéž po dobu 48 h. Vlhkostí 75 % a 95 % byl vzorek vystaven po dobu 100 h., přičemž vlhkost 75 % byla realizována pomocí nasyceného roztoku $NaCl$ a 93 % pomocí nasyceného roztoku KNO_3 . Po navlhání na každé relativní vlhkosti byly vždy vzorky proměřeny na měřicím přístroji Agilent E4980A pro zjištění jejich kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla. Měření probíhalo pětkrát při zapnutých korekcích a pětkrát při vypnutých korekcích. Poté byly výsledky statisticky a graficky vyhodnoceny.

2.4 Výsledky experimentu

Experimentální práce byla zaměřena na sledování vlivu stárnutí, tepelného, elektrického a kombinovaného namáhání na dielektrické vlastnosti, především kmitočtové závislosti obou složek komplexní permitivity, vzorků drážkové izolace na bázi polyesterové fólie Isonom[®] NMN. Současně byl sledován vliv relativní vlhkosti prostředí na vlastnosti předloženého materiálu Isonom[®] NMN. V průběhu namáhání byly sledovány také změny hmotností zkušebních vzorků. Vzorky byly váženy před stárnutím a poté vždy po navlhnutí při 33%, 55%, 75% a 93% relativní vlhkosti prostředí. Hmotnosti jsou uvedeny v tab. 2.2.

Tab. 2.2 Hmotnosti vzorků

č. vzorku	hmotnost									
	převzetí vz.	0 h	Δm	100 h	Δm	250 h	Δm	500 h	Δm	
	[g]	[g]	%	[g]	%	[g]	%	[g]	%	
175 °C	J1	4,041	4,016	-0,619	4,001	-0,990	4,001	-0,990	3,990	-1,262
	J2	4,083	4,060	-0,563	4,040	-1,053	4,042	-1,004	4,030	-1,298
	J3	4,061	4,038	-0,566	4,022	-0,960	4,019	-1,034	4,009	-1,280
	J9	3,201	3,184	-0,531	3,172	-0,906	3,172	-0,906	3,164	-1,156
195 °C	J4	4,020	3,996	-0,597	3,976	-1,095	3,956	-1,592	3,948	-1,791
	J5	4,049	4,025	-0,593	4,004	-1,111	3,988	-1,507	3,977	-1,778
	J6	4,049	4,024	-0,617	4,004	-1,111	3,994	-1,358	3,981	-1,679
	J10	3,152	3,136	-0,508	3,127	-0,793	3,120	-1,015	3,109	-1,364

č. vzorku	hmotnost									
	převzetí vz.	33 %	Δm	55 %	Δm	75 %	Δm	93 %	Δm	
	[g]	[g]	%	[g]	%	[g]	%	[g]	%	
100 h 1,55 kV 23 °C	1	3,401	3,377	-0,706	3,390	-0,323	3,405	0,118	3,440	1,147
	2	3,422	3,403	-0,555	3,416	-0,175	3,430	0,234	3,469	1,373
	3	3,399	3,376	-0,677	3,389	-0,294	3,404	0,147	3,439	1,177
100 h 1,55 kV 200 °C	4	3,351	3,327	-0,716	3,342	-0,269	3,359	0,239	3,387	1,074
	5	3,343	3,323	-0,598	3,336	-0,209	3,354	0,329	3,382	1,167
	6	3,375	3,355	-0,593	3,369	-0,178	3,388	0,385	3,414	1,156
100 h 2,0 kV 23 °C	7	3,692	3,665	-0,731	3,681	-0,298	3,703	0,298	3,727	0,948
	8	3,735	3,708	-0,723	3,723	-0,321	3,743	0,214	3,768	0,884
	9	3,741	3,718	-0,615	3,733	-0,214	3,756	0,401	3,779	1,016
0 h 0,0 kV 23 °C	10	3,743	3,717	-0,695	3,733	-0,267	3,759	0,427	3,778	0,935
	11	3,756	3,749	-0,186	3,762	0,160	3,792	0,958	3,818	1,651
	12	3,802	3,799	-0,079	3,813	0,289	3,840	0,999	3,860	1,526
50 h 2 kV 200 °C	13	3,725	3,697	-0,752	3,707	-0,483	3,736	0,295	3,757	0,859
	14	3,759	3,731	-0,745	3,745	-0,372	3,772	0,346	3,793	0,904
	15	3,748	3,723	-0,667	3,737	-0,293	3,761	0,347	3,786	1,014

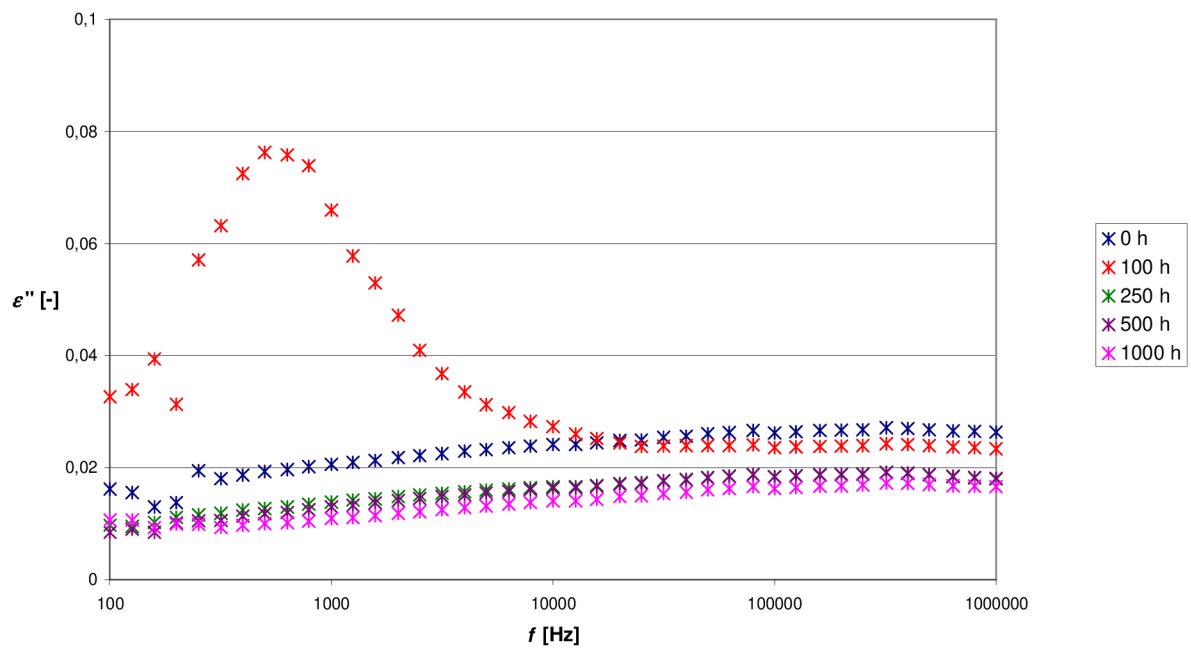
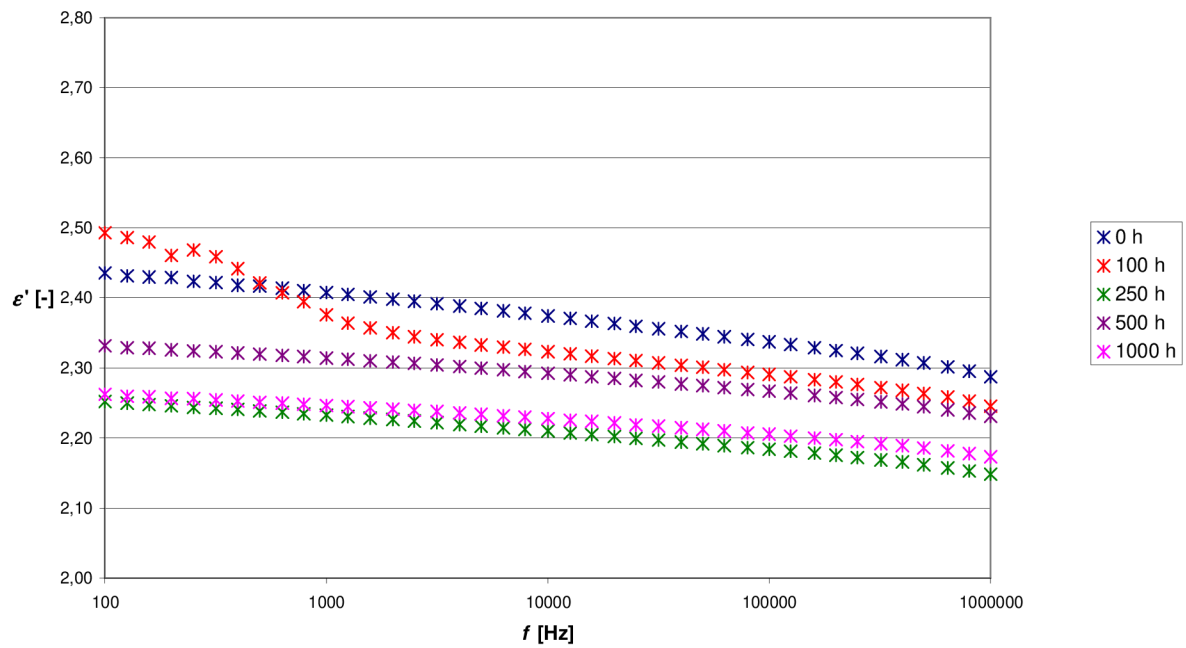
Na všech vzorcích byly proměřeny kmitočtové závislosti kapacity a ztrátového činitele, které byly následně přepočteny na kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou uloženy na příloženém datovém médiu. Grafické zpracování naměřených výsledků zkušebních vzorků, které byly vystaveny tepelnému namáhání, měřených přístrojem Agilent 4284A, jsou uváděny v kmitočtovém rozsahu 10^2 Hz až 10^6 Hz, elektricky a tepelně namáhané vzorky, jejichž parametry byly měřeny přístrojem Agilent E4980E, jsou uváděny v kmitočtovém rozsahu $2 \cdot 10^1$ Hz až $2 \cdot 10^6$ Hz.

K vyhodnocení tepelného namáhání byly vybrány dva vzorky. Tyto vzorky byly namáhány, jeden teplotou 175 °C po dobu 1000 h (obr. 2.8), druhý teplotou 195 °C po dobu 500 h (obr. 2.9). Pro posouzení vlivu vzduchové mezery na výsledky měření byl navíc hodnocen třetí vzorek, opatřený napařenými elektrodami, který byl vystaven teplotě stárnutí 175 °C po dobu 500 h (obr. 2.10).

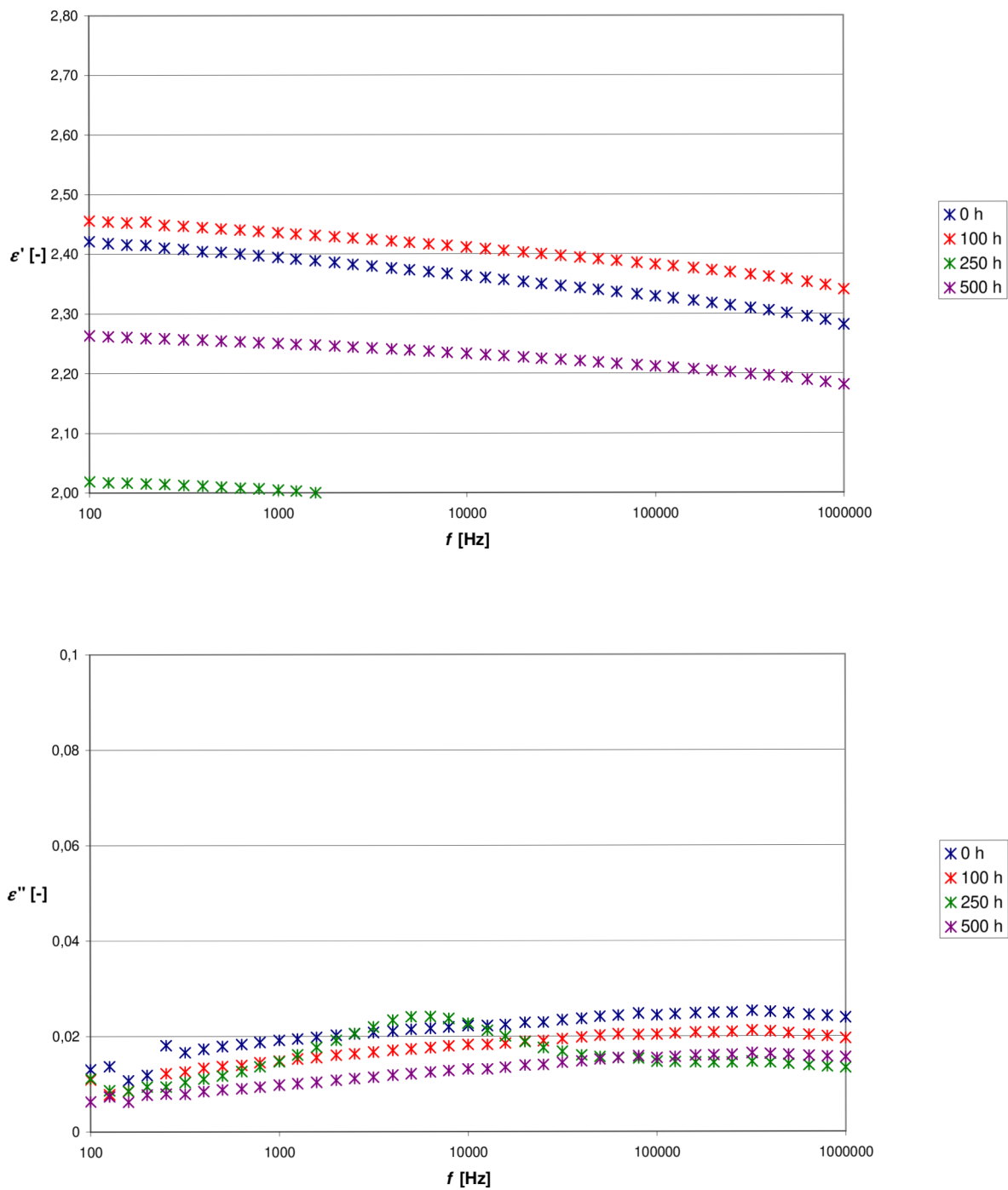
Pro sledování účinků elektrického namáhání byly zvoleny dva vzorky. Jeden vzorek byl vložen mezi elektrody střídavého napětí o hodnotě 1,55 kV po dobu 100 h (obr. 2.11) a druhý vzorek byl vystaven účinkům elektrického zprostředkovaného napětím 2,0 kV po dobu 100 h (obr. 2.12). Tyto vzorky byly po namáhání postupně vystaveny prostředím s různou relativní vlhkostí vzduchu.

Pro posouzení vlivu kombinovaného namáhání byly vybrány další dva vzorky. První vzorek byl exponován v prostředí dané parametry: teplota 200 °C , napětí 1,55 kV po dobu 100 h (obr. 2.13). Druhý vzorek byl vystaven podmínkám: 200 °C a 2,0 kV po dobu 50 h (obr. 2.14). I tyto vzorky byly následně vystaveny vlivu prostředí s různou relativní vlhkostí vzduchu.

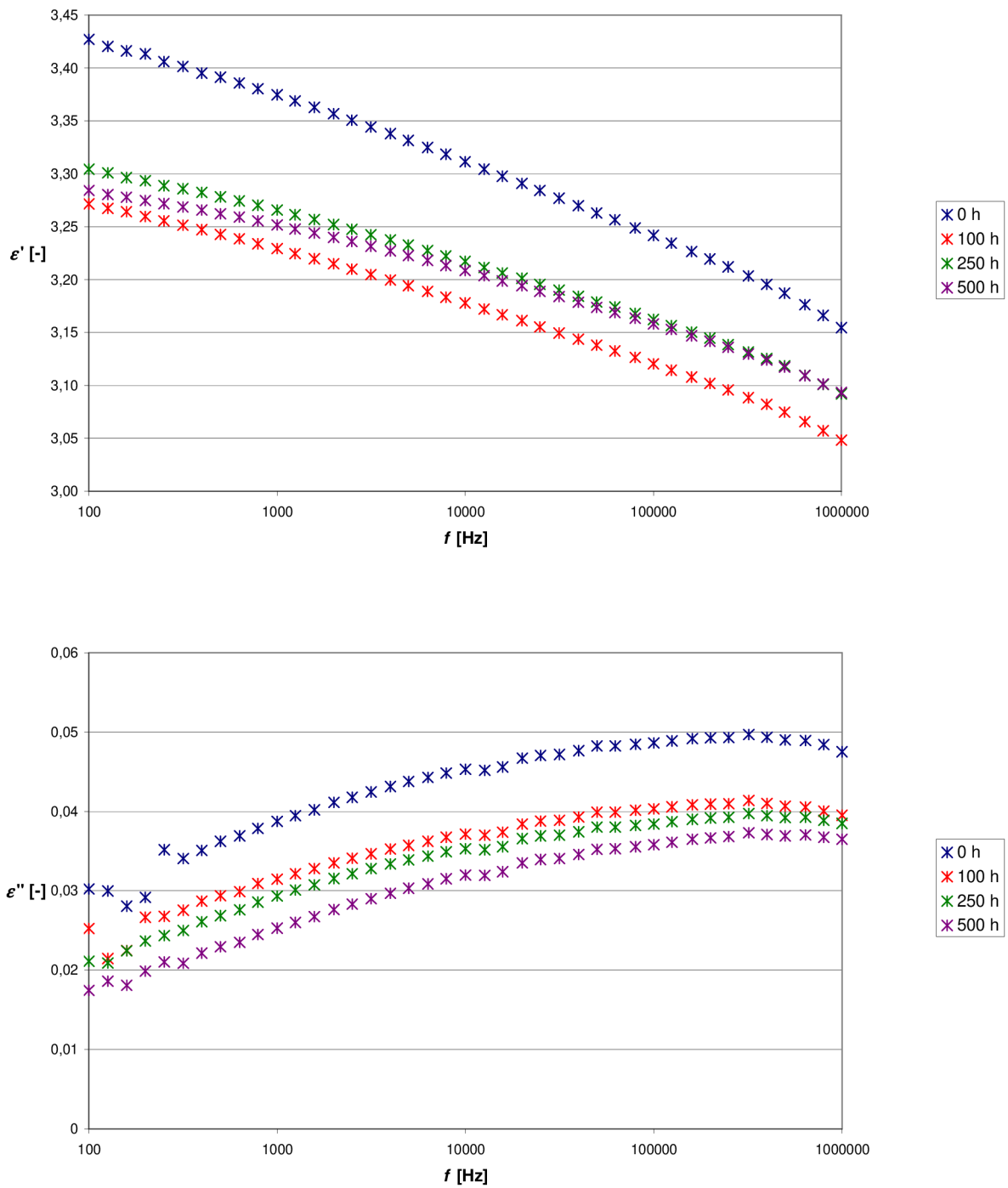
Pro vyhodnocení vlivu navlhání na dielektrické vlastnosti materiálu byly připraveny tři vzorky, které nebyly vystaveny žádnému namáhání, pouze vlivu různé relativní vlhkosti prostředí. (obr. 2.15).



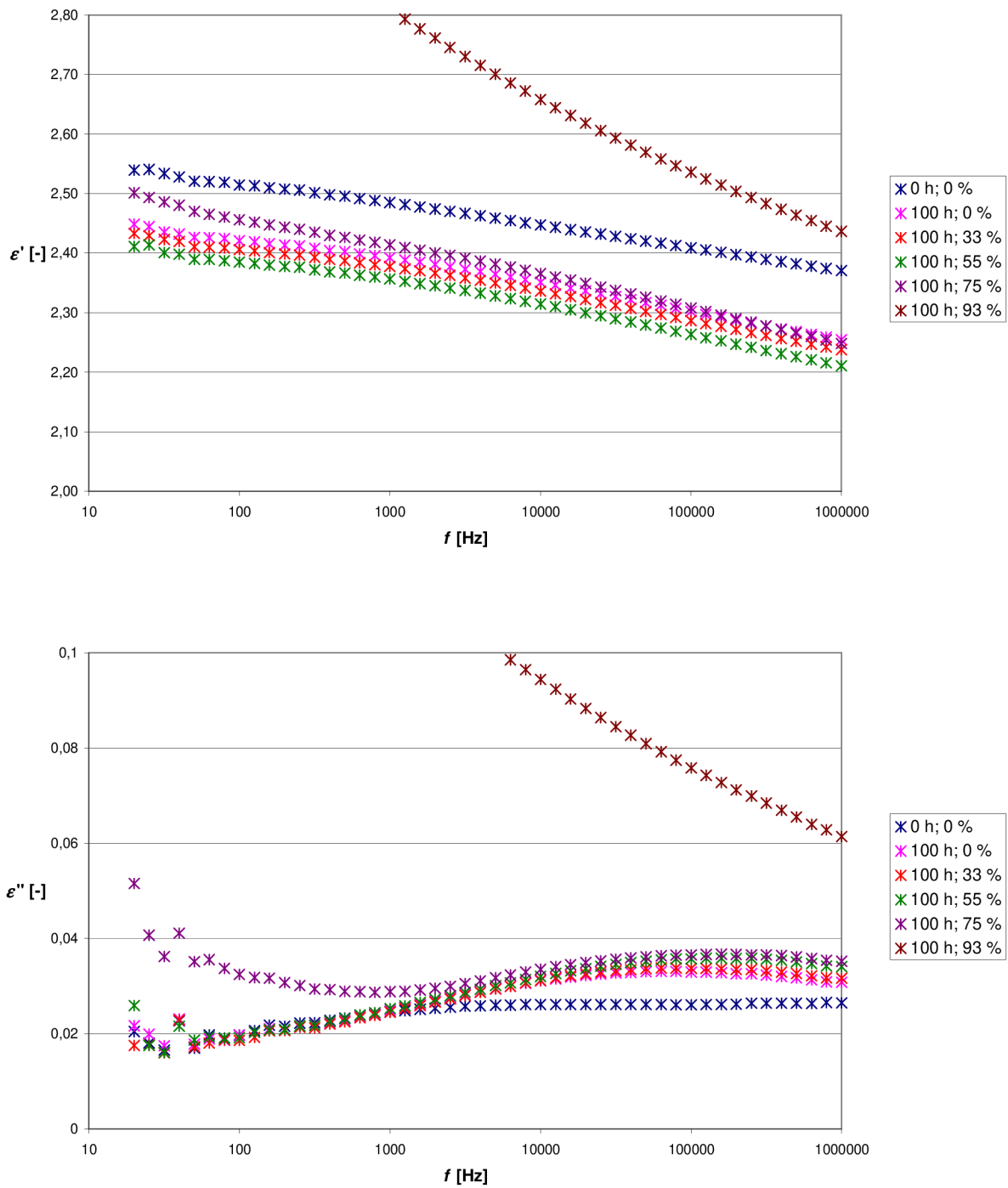
Obr. 2.8 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku tepelně namáhaného při teplotě 175 °C; teplota měření 23 °C



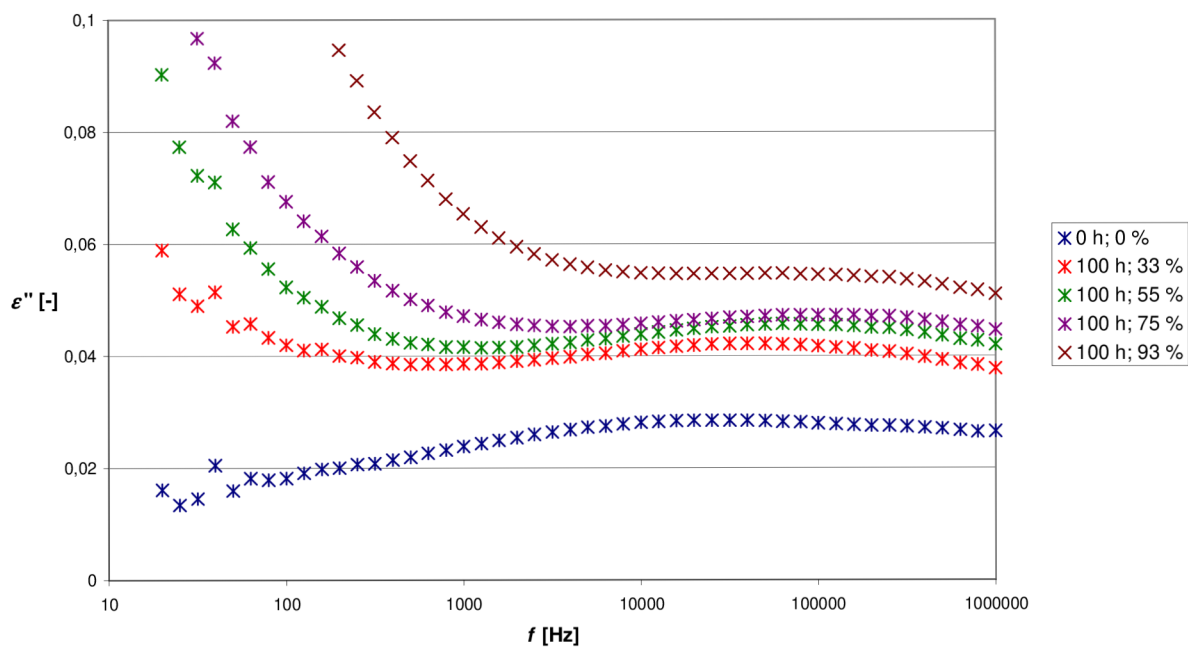
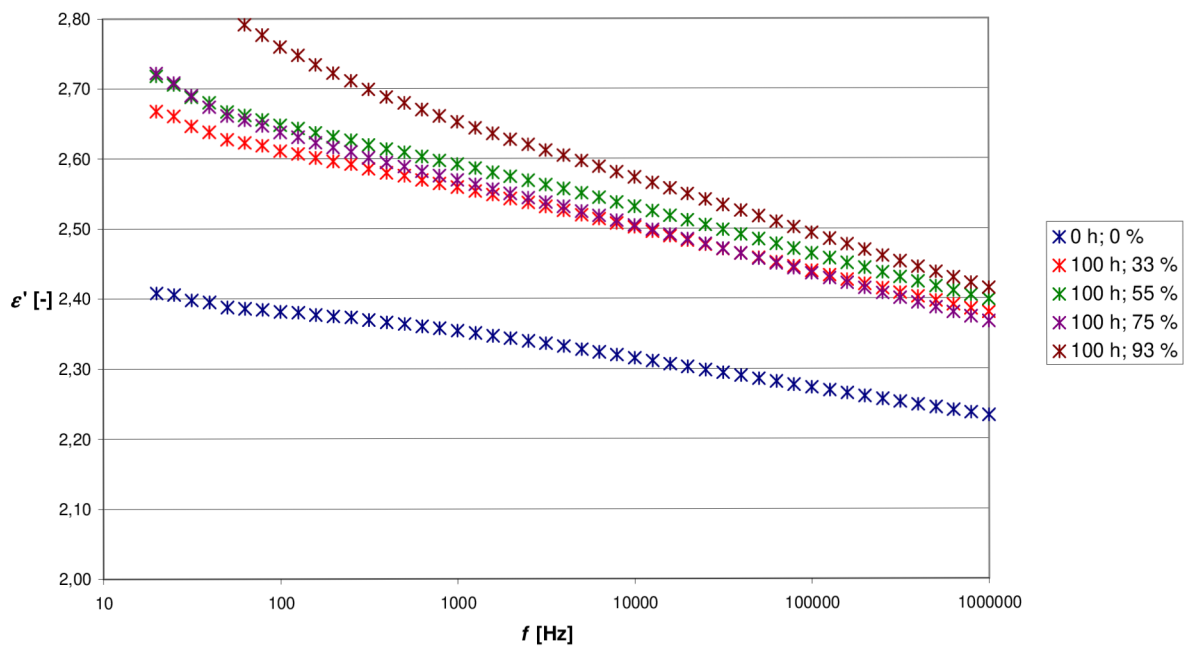
Obr. 2.9 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku tepelně namáhaného při teplotě 195 °C; teplota měření 23 °C



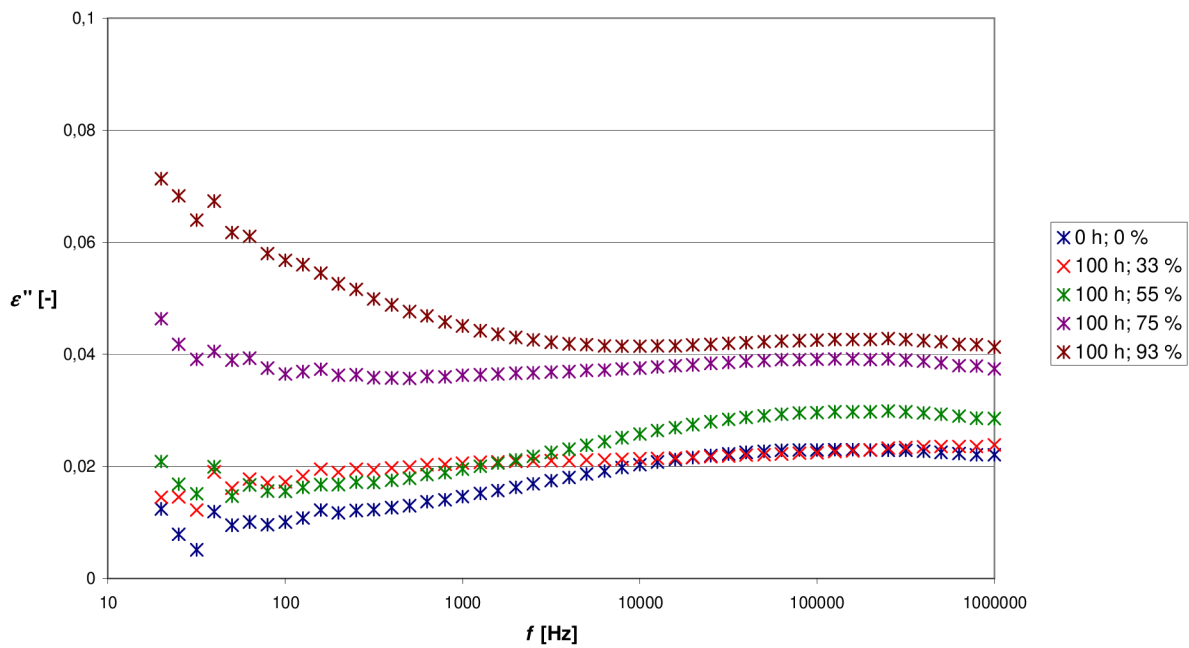
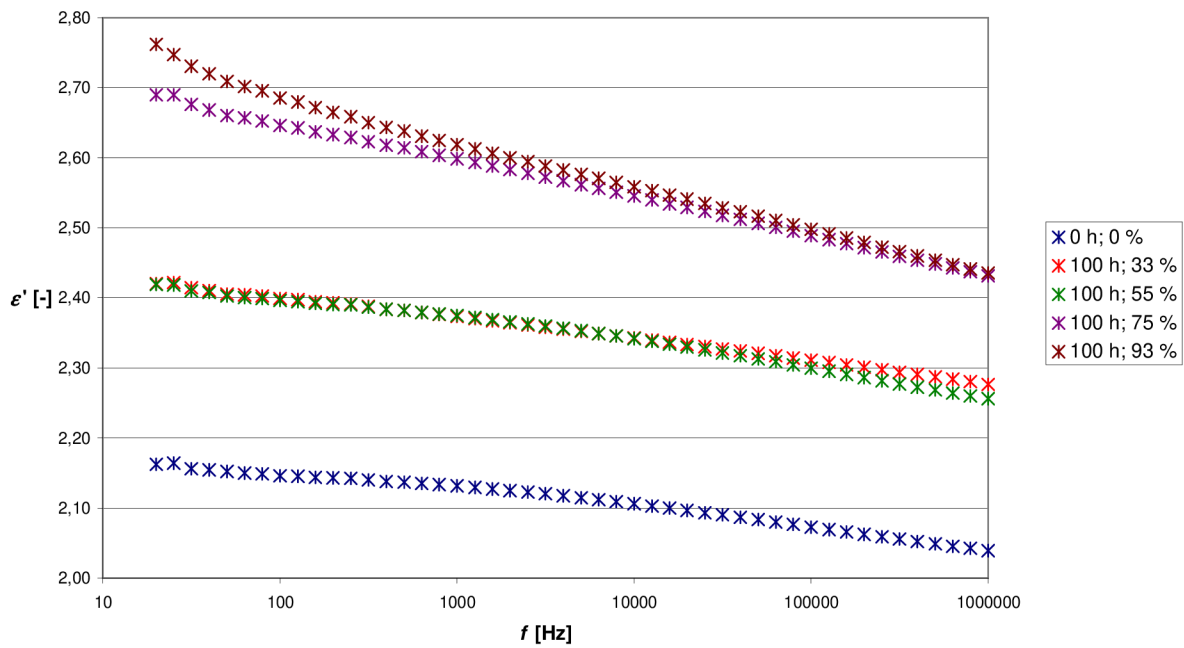
Obr. 2.10 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku tepelně namáhaného při teplotě 195 °C; teplota měření 23 °C, napařené elektrody



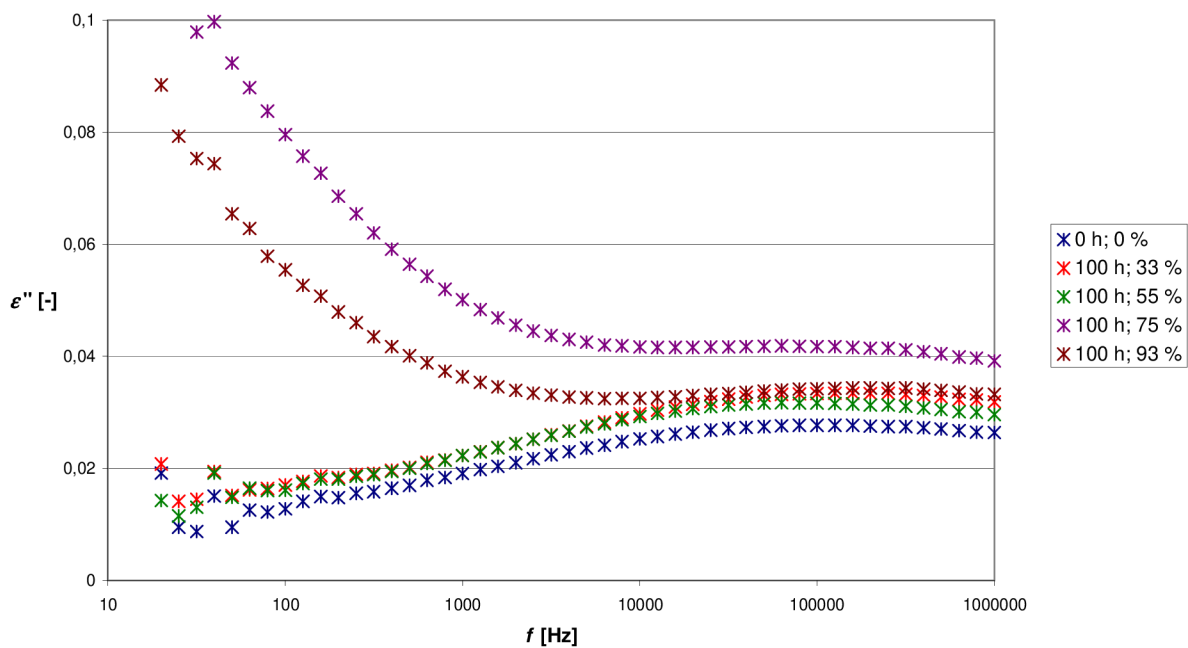
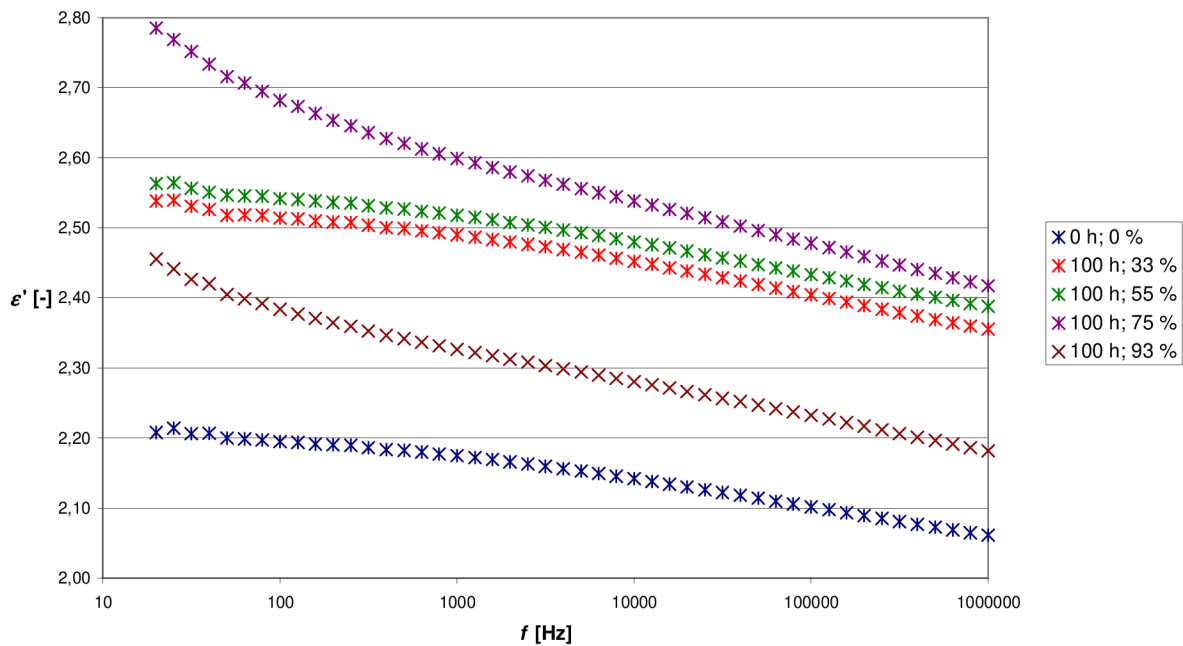
Obr. 2.11 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku elektricky namáhaného při napětí 1,55 kV; teplota měření 23 °C



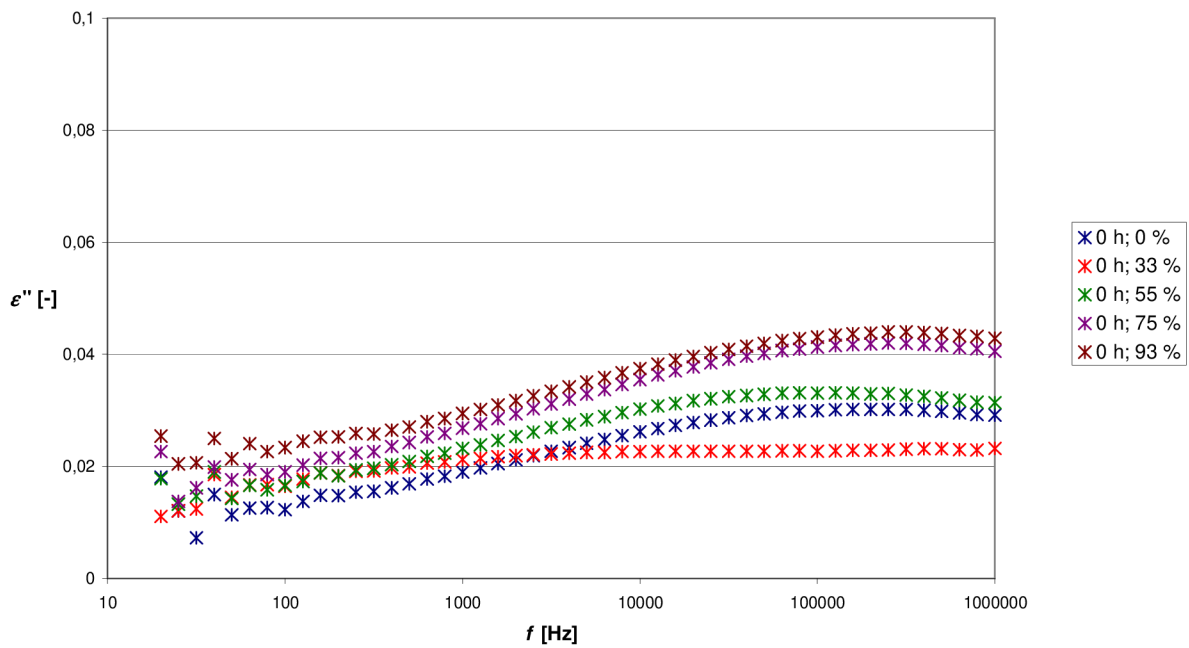
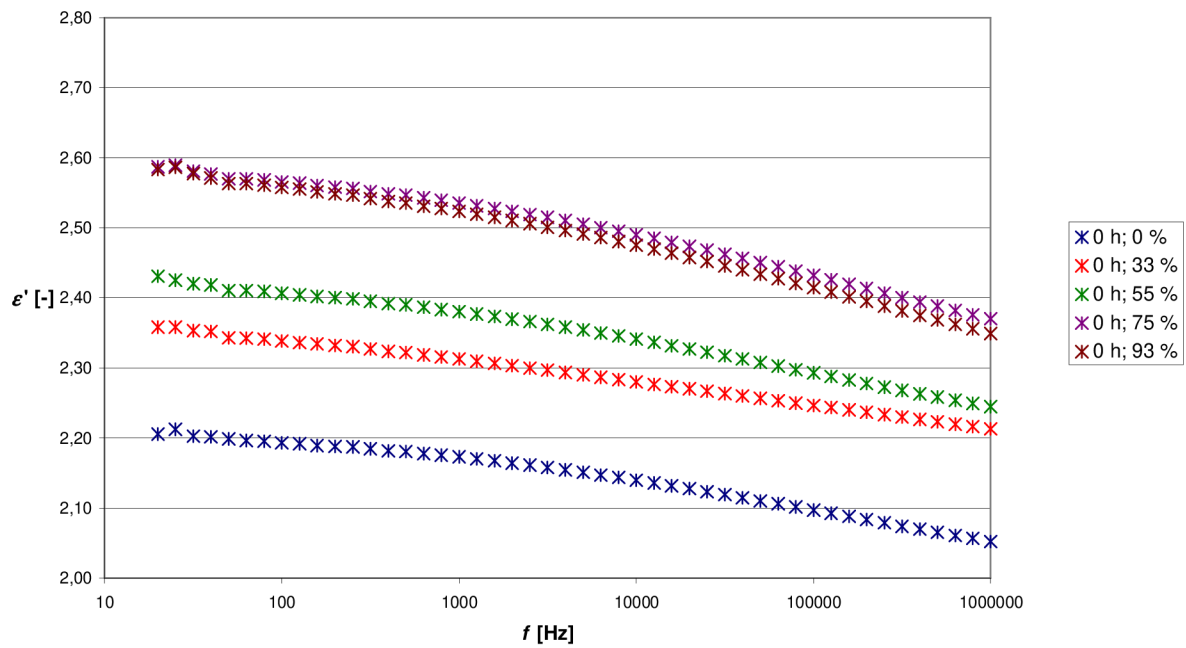
Obr. 2.12 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku elektricky namáhaného při napětí 2,0 kV; teplota měření 23 °C



Obr. 2.13 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku kombinově namáhaného při napětí 1,55 kV; teplotě 200 °C; teplota měření 23 °C



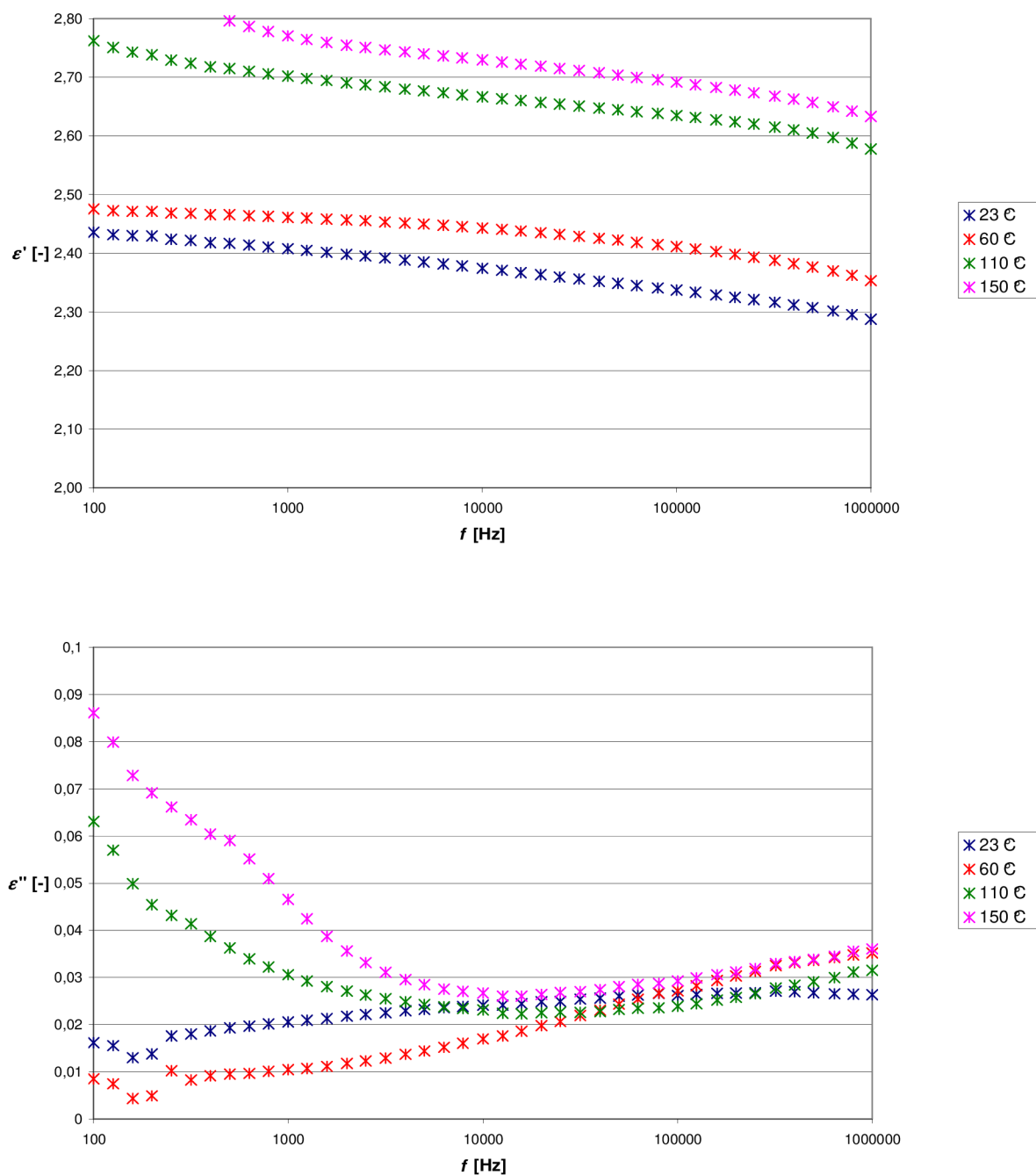
Obr. 2.14 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku kombinově namáhaného při napětí 2,0 kV; teplotě 200 °C; teplota měření 23 °C



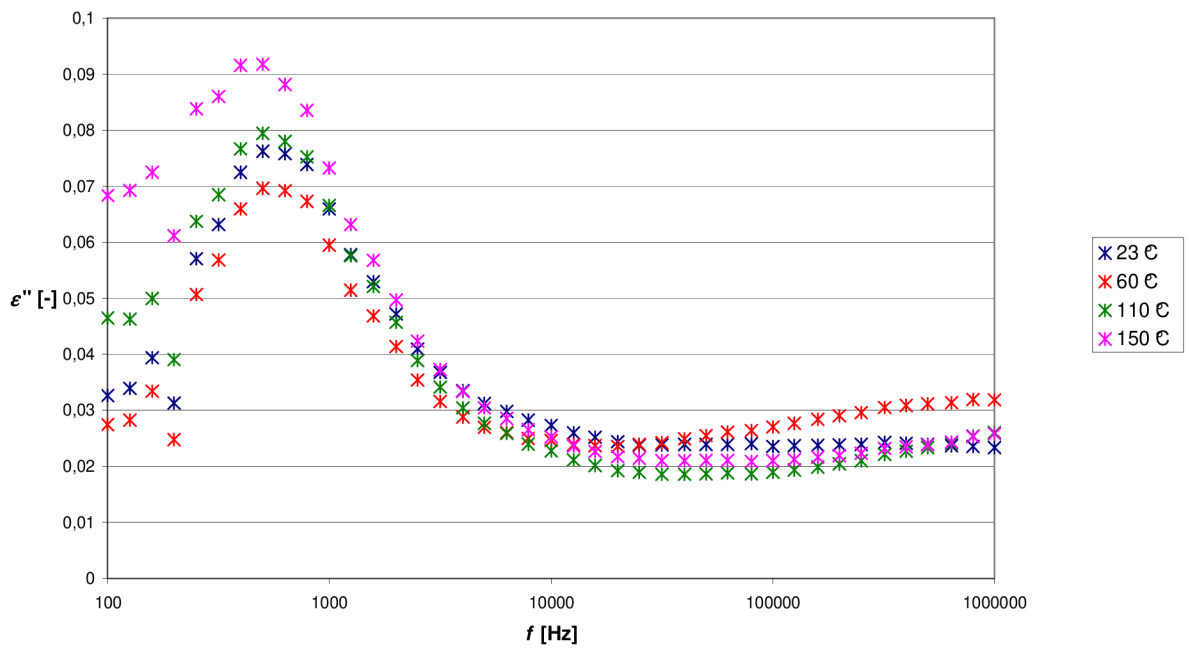
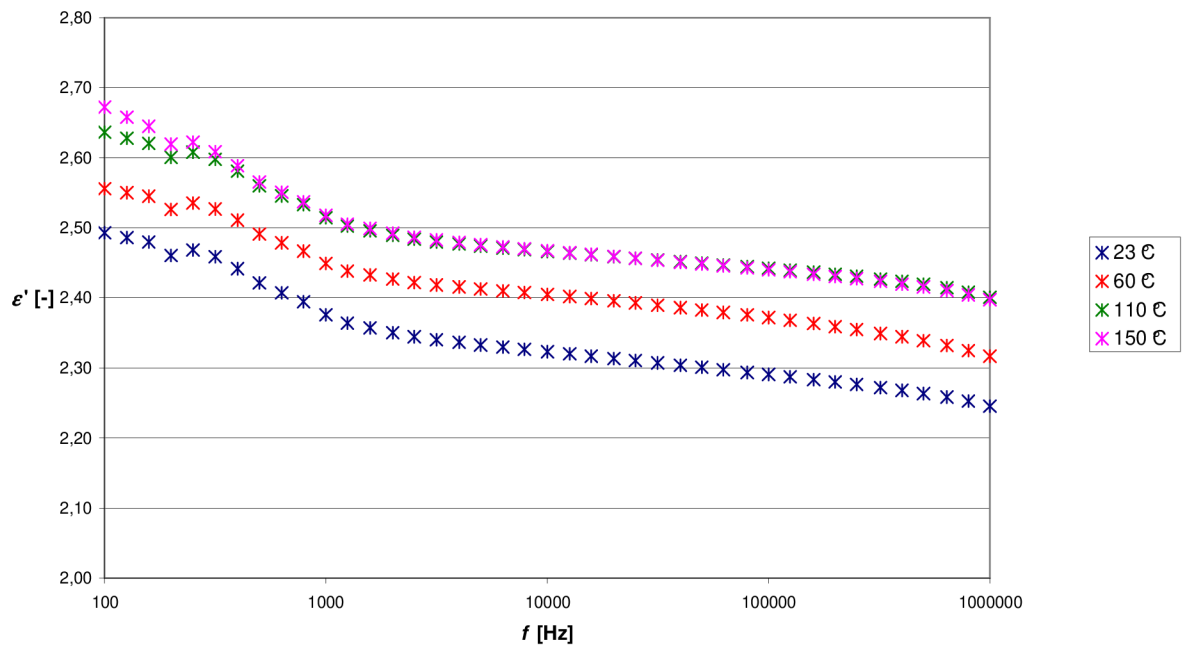
Obr. 2.15 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku v dodaném stavu; teplota měření 23 °C

3 Vyhodnocení experimentu

U teplotně namáhaných vzorků byl proveden experiment, sledující teplotní a kmitočtové závislosti obou složek komplexní permitivity. Měření probíhalo při teplotě okolí a dále pro 60 °C, 110 °C a 150 °C. Tyto závislosti jsou uvedeny na obr. 3.1 a obr. 3.2.

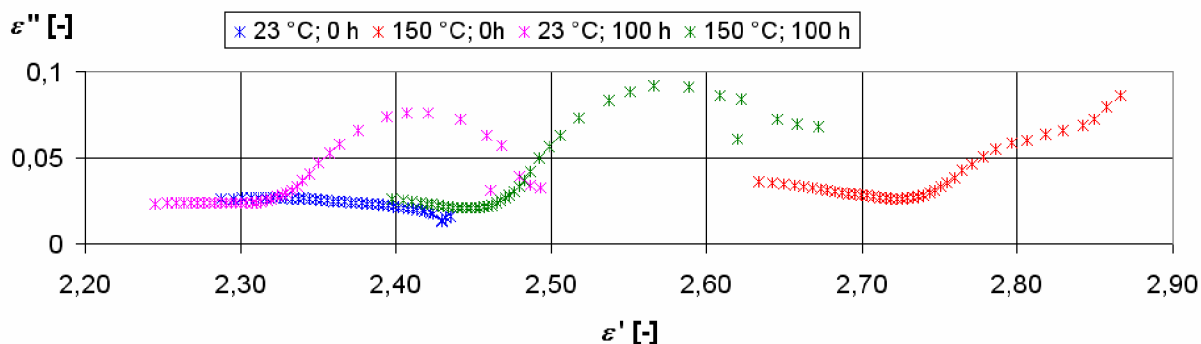


Obr. 3.1 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku tepelně stárnutého při 175 °C; stárnutí 0 h



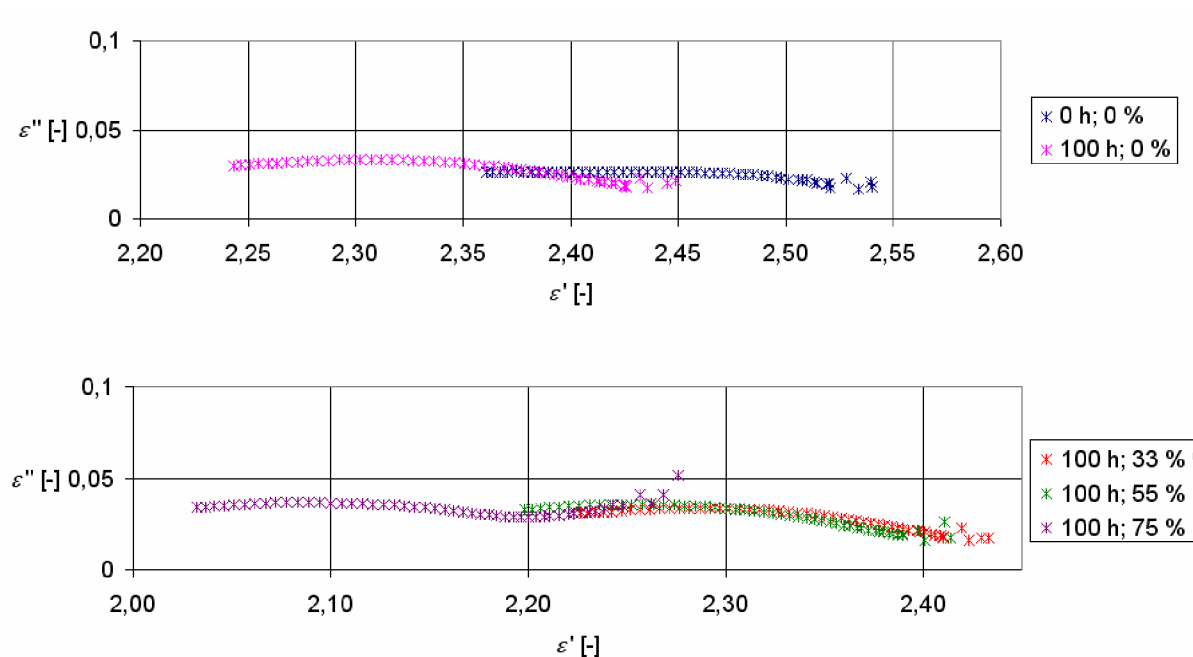
Obr. 3.2 Závislosti $\epsilon' = f(f)$, $\epsilon'' = f(f)$ vzorku tepelně stárnutého při 175 °C; stárnutí 100 h

Pro tepelně namáhané vzorky je na obr. 3.3 znázorněn Coleho-Coleho kruhový diagram, na němž lze sledovat změny poloh vrcholů závislosti $\epsilon'' = f(\epsilon')$ z hlediska změny teploty měření a změny doby stárnutí.

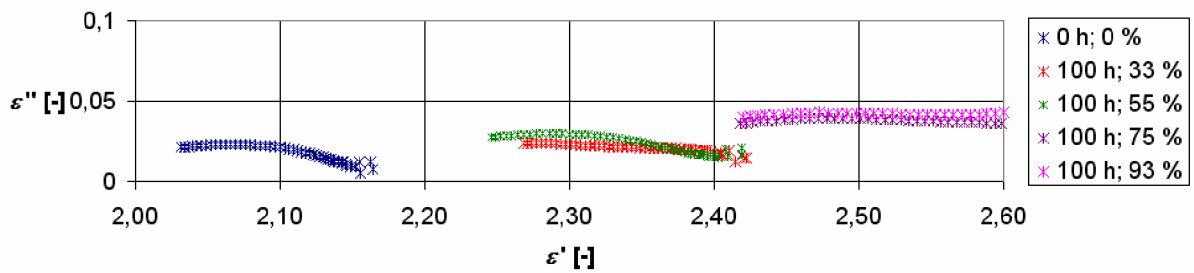


Obr. 3.3 Závislost $\epsilon''=f(\epsilon')$ tepelně namáhaného vzorku při teplotě 175 °C

Pro elektricky (obr. 3.4) a kombinovaně (obr. 3.5) namáhané vzorky, jež byly vystaveny vlivu relativní vlhkosti prostředí, byly taktéž sestaveny Coleho-Coleho kruhové diagramy. Jejich vypovídací schopnost ovšem není tak patrná jako u vzorků vystavených tepelnému namáhání. U materiálu se totiž vlivem vlhkosti zvětšuje relativní permitivita, ale dielektrické ztráty se mění jen nepatrně. Z toho důvodu nemůžeme sestavit Coleho-Coleho kruhový diagram, kde by bylo možno vidět posouvání maxim závislosti $\epsilon''=f(\epsilon')$, protože musí být zachován poměr os v měřítku 1:1.



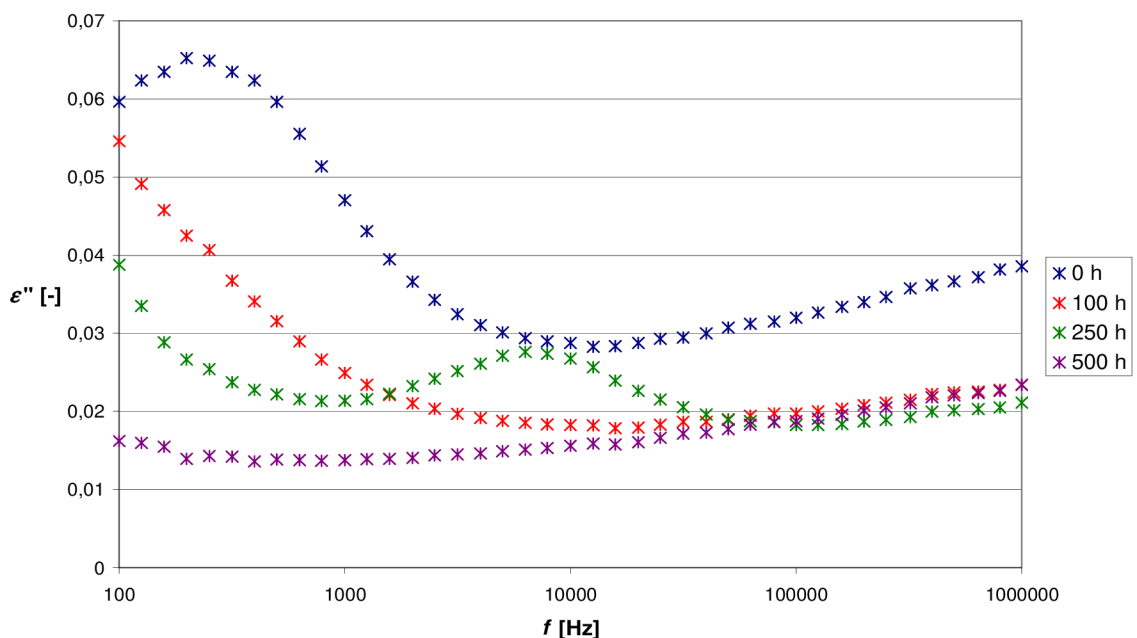
Obr. 3.4 Závislost $\epsilon''=f(\epsilon')$ vzorku elektricky namáhaného při napětí 1,55 kV; teplota měření 23 °C



Obr. 3.5 Závislost $\epsilon''=f(\epsilon')$ vzorku kombinovaně namáhaného při napětí 1,55 kV; teplota stárnutí 200 °C; teplota měření 23 °C

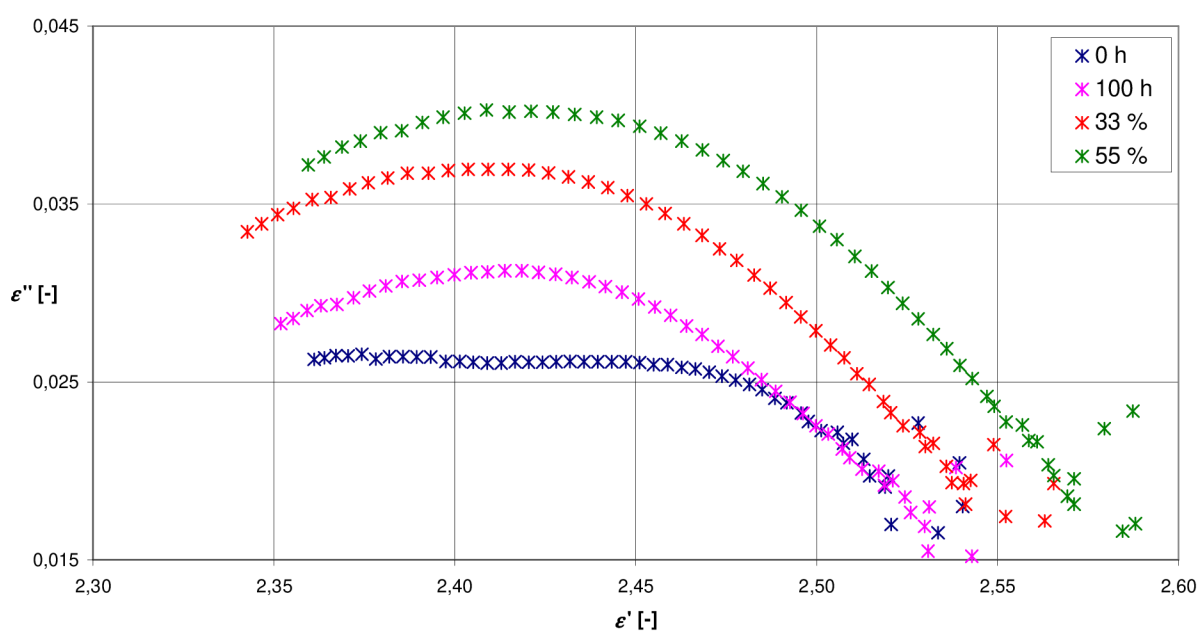
Zkoumání obou složek komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu odhalil charakteristiku dielektrika relaxačního typu. V materiálu Isonom[®] NMN se během stárnutí vyskytly relaxační procesy, které jsou patrné z grafických závislostí $\epsilon''=f(f)$.

U vzorků, které byly vystaveny tepelnému namáhání, se u kmitočtových závislostí ztrátového čísla objevily dva relaxační procesy. Intenzita obou relaxačních maxim se zvyšovala se vzrůstající teplotou měření. S rostoucí dobou tepelného namáhání se polohy jednotlivých relaxačních maxim posouvaly směrem k nižším kmitočtům. Tento posun lze vidět na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Závislost $\epsilon''=f(f)$ vzorku tepelně namáhaného při teplotě 195 °C; teplota měření 150 °C

U vzorků vystavených elektrickému namáhání je patrný posun relaxačního maxima směrem k vyšším kmitočetům. To je patrně zapříčiněno relaxačním procesem jiného typu, než u tepelného namáhání. Vzorky byly po namáhání vystaveny vlivu relativní vlhkosti okolního prostředí. Se zvyšující se vlhkostí se intenzita relaxačního maxima zvyšovala. To lze vidět na Coleho-Coleho kruhovém diagramu na obr. 3.7, který ovšem nemá poměr os ϵ' : ϵ'' shodný, ale v poměru 10:1 pro lepší vypovídající schopnost. Vyšší vlhkost má za následek i zvýšení dielektrických ztrát v materiálu. To je zapříčiněno vyšší povrchovou vodivostí materiálu Nomex[®].



Obr. 3.7 Závislost $\epsilon''=f(\epsilon')$ vzorku elektricky namáhaného při napětí 1,55 kV; teplota měření 23 °C

Při sledování dielektrických vlastností kombinovaně namáhaných vzorků se projevil děje, které svědčí o součinnosti degradačních procesů během tepelného a elektrického namáhání. Vliv tepelného namáhání se projevil výskytem dvou relaxačních maxim, vliv elektrického namáhání napovídá posun těchto maxim k vyšším kmitočetům při vyšší intenzitě elektrického pole.

Při měření na vzorcích s přiloženými a napařenými elektrodami se projevil vliv vzduchové mezery na měření. Při měření vzorků s napařenými elektrodami byla naměřena vyšší kapacita zkoumaného dielektrika což mělo za následek zvýšení hodnot relativní permitivity vzorků.

Sledováním vlivu způsobu měření z hlediska korekcí se projevil parazitní vliv kapacity přívodů. Při měření se zapnutými korekcemi byly naměřená relativní permitivita řádově o hodnotu 0,2 vyšší, než při měření s vypnutými korekcemi.

Zkoumaný materiál Isonom[®] NMN degradoval především při tepelném namáhání. Jedna z jeho složek je totiž polyethylentereftalát, jehož dlouhodobá teplotní mez je 150 °C. Při tepelném a kombinovaném namáhání byl materiál vystaven teplotám vyšším, než je tato mez což zapříčinilo fyzikálněchemickou změnu této složky. Při termické degradaci PETF se uvolňují vazby jeho struktury a dochází k uvolňování uhlíkových zbytků.

Vrstva papíru Nomex[®] tyto teploty snáší, dochází k optickým změnám, které nemají na dielektrické vlastnosti vliv. Dále dochází k vytvrzení pojiva a stabilizaci vlastností papíru Nomex[®] vlivem teploty.

Vlivem elektrického pole u elektrického a kombinovaného namáhání nedošlo k průrazu materiálu. Průrazné napětí materiálu Isonom[®] NMN je téměř desetkrát vyšší než napětí, kterému byl materiál během experimentu vystaven.

Při kombinovaném namáhání došlo ke změně struktury papíru Nomex[®] při okraji elektrod. V tomto místě byla intenzita elektrického pole několikanásobně vyšší, než v místech, kde byla přiložena plocha elektrod (viz obr. 2.3 vpravo).

4 Závěr

V předložené diplomové práci byly zhodnoceny vlivy tepelného, elektrického a kombinovaného namáhání na dielektrické vlastnosti drážkové izolace Isonom[®] NMN. Nedestruktivní metodou dielektrické relaxační spektroskopie byly experimentálně prošetřeny obě složky komplexní permitivity. Současně byl sledován i vliv relativní vlhkosti prostředí na dielektrické vlastnosti zkoumaného materiálu na vybraných hladinách namáhání. Všechny naměřené hodnoty jsou uloženy na přiloženém datovém paměťovém mediu, CD-ROM.

Dosažené výsledky získané metodou dielektrické relaxační spektroskopie lze shrnout do několika bodů:

- nejvíce degradačních procesů v materiálu Isonom[®] NMN nastává vlivem teplotního namáhání,
- Isonom[®] NMN vykazuje charakteristické vlastnosti materiálu relaxačního typu; v kmitočtové oblasti $2 \cdot 10^1$ Hz až $2 \cdot 10^6$ Hz byl zaznamenán výskyt dvou relaxačních maxim, jejichž intenzita se zvyšovala v průběhu tepelného namáhání,
- postupnou tepelnou degradací dochází k velkému zvýšení dielektrických ztrát v materiálu, při elektrickém namáhání nejsou tyto ztráty tak významné,
- velikost hodnoty relativní permitivity a dielektrických ztrát je ovlivněna výší relativní vlhkosti prostředí, kterému je Isonom[®] NMN vystaven; přičemž v počátečních úrovních tepelného, elektrického a kombinovaného namáhání vykazoval materiál nižší míru navlhavosti.

Podstatný přínos práce spočívá především v přehledu modelování doby života v průběhu tepelného, elektrického a kombinovaného namáhání. Důležitou součástí celého experimentu bylo navržení, provedení a odzkoušení pracoviště pro kombinované namáhání, které dosud nebylo na UETE realizováno. Bylo potřeba nejprve prozkoumat soustavu poznatků o elektrickém a vícefaktorovém namáhání a dále sestavit vysokonapěťový zdroj a elektrodový systém pro elektrické a kombinované namáhání.

V dalším období je potřeba provést rozsáhlejší experiment na materiálu Isonom[®] NMN, který by výrazněji odhalil vliv elektrického a kombinovaného namáhání na dielektrické vlastnosti materiálu a aplikovat některé životnostní modely pro posouzení doby života materiálu. Dále by měly být zhotoveny tzv. Rogovského elektrody pro zamezení zvýšení intenzity elektrického pole na hraně elektrodového systému při elektrickém a kombinovaném namáhání.

5 Použitá literatura

- [1] LIEDERMANN, K., a spol. *Materiály v elektrotechnice: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně*, Brno 2002
- [2] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 1. vydání, 240 s. ISBN 80-7300-189-6
- [3] MONTANARI, G.C., MAZZANI, G., SIMONI, L.: *Modeling of electrothermal life models*, Department of Electrical Engineering, University of Bologna 2002, Italy
- [4] LIEDERMANN, K., *Klimatotechnologie*, UETE Vysokého učení technického v Brně, Brno 2006
- [5] HP 4284a Precision LCR meter-Operation manual. Hewlett-Packard, LTD, Yokogava 1989
- [6] ISOVOLTA ELEKTROISOLIERSTOFFE. Wiener Neudorf, Austria. *Technische information ISONOM NMN 0881*. b. r. 2 s.
- [7] Norma ČSN EN 60505. *Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů*. 2005.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[s]	materiálová konstanta
b	[K ⁻¹]	materiálová konstanta
B	[hodin/roků]	materiálová konstanta
c	[mol.dm ⁻³]	koncentrace
C_1	[m.h.V ⁻¹]	materiálová konstanta
C_E	[m.h.V ⁻¹]	materiálová konstanta
d	[m]	vzdálenost elektrod
E	[V.m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
E_p	[V.m ⁻¹]	elektrická pevnost
E_t	[V.m ⁻¹]	prahová hodnota el. namáhání
E_0	[V.m ⁻¹]	hodnota el. namáhání, kdy jeho vliv můžeme zanedbat
E'	[V.m ⁻¹]	elektrické namáhání
f	[Hz]	kmitočet
g	[-]	materiálová konstanta
h	[m.V ⁻¹]	činitel elektrické odolnosti
I	[A]	proud
I_p	[A.m ⁻¹]	proud tekoucí po povrchu izolantu
i	[-]	exponent, řád reakce
k	[J.K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
l_e	[m]	délka elektrod na povrchu izolantu
k_c	[-]	tvarový koeficient
M	[hodin/roků]	materiálová konstanta
m	[kg]	hmotnost
m_0	[kg]	hmotnost dokonale vysušené látky
n	[m ⁻³]	koncentrace nosičů el. náboje
O	[K]	tepelná odolnost
P	[C.m ⁻²]	polarizace
P_z	[W]	ztrátový výkon
p	[W.kg ⁻¹]	měrné dielektrické ztráty
q	[C]	elektrický náboj
R	[-]	rychlost degradace

R'	[s ⁻¹]	celková počet vzájemných srážek reagujících molekul za jednotku času
R_p	[Ω]	povrchový elektrický odpor
r	[m]	poloměr kružnice
S	[-]	namáhání obecně
S'	[-]	prahová hodnota namáhání
T	[K]	tepelné namáhání
t	[s]	čas
t_T	[hodin/roků]	doba života při tepelném namáhání
t_{T0}	[hodin/roků]	doba života při tepelném namáhání. kdy $\vartheta_T=0$ K
t_E	[hodin/roků]	doba života při elektrickém namáhání
t_{E0}	[hodin/roků]	doba života při tepelném namáhání. kdy $E=0$ V.m ⁻¹
t_K	[hodin/roků]	doba života při kombinovaném namáhání
t_{K0}	[hodin/roků]	doba života při tepelném namáhání, kdy můžeme kombinované namáhání zanedbat
tg δ	[s]	ztrátový činitel
U	[V]	napětí
W	[J]	vazební energie
ΔW_A	[J]	aktivační energie
X	[-]	střed kružnice
α	[-]	činitel vyjadřující rozložení relaxačních časů
β	[-]	parametr charakterizující asymetrii disperzní křivky
γ	[-]	distribuční parametr
δ	[°]	ztrátový úhel
ϵ'	[-]	relativní permitivita
ϵ''	[-]	ztrátové číslo
ϵ^*	[-]	komplexní permitivita
ϵ_S	[-]	statická permitivita
ϵ'_S	[-]	relativní permitivita složené soustavy
ϵ_∞	[-]	optická permitivita
ϵ''_m	[-]	maximum ztrátového čísla
ϕ	[kg.m ⁻³]	absolutní vlhkost
ϕ_{\max}	[kg.m ⁻³]	maximální absolutní vlhkost

φ	[%]	relativní vlhkost
η	[hodin/roků]	parametr Weibullyho funkce
κ	[-]	rychlostní konstanta
λ	[-]	parametr charakterizující šířku relaxačního spektra
μ	[m ² .V ⁻¹ .s ⁻¹]	driftová pohyblivost
γ_p	[S]	povrchová vodivost
γ_v	[S.m ⁻¹]	vnitřní vodivost
π	[-]	exponent
v_i	[-]	objemový díl i-té složky složené soustavy
ϑ	[°C]	teplota
ϑ_T	[°C]	teplota stárnutí
ρ_p	[Ω]	povrchová rezistivita
ρ_v	[Ω.m]	vnitřní rezistivita
τ	[s]	relaxační doba
τ_v	[s]	doba pobytu molekuly vody
ω	[rad.s ⁻¹]	úhlový kmitočet
ω_m	[rad.s ⁻¹]	úhlový kmitočet při maximu ztrátového čísla
ψ	[%]	vlhkost
Θ	[K]	absolutní teplota
T_T	[K ⁻¹]	absolutní teplota stárnutí
Θ_0	[K]	teplota, kdy můžeme tepelné namáhání zanedbat
T_T'	[K ⁻¹]	prahová hodnota tepelného namáhání
\hbar	[-]	tvarový parametr
IPM		inverzní mocninný vztah
NMN		nomex-pelyester-nomex
TI		teplotní index
HIC		půlící interval
PETF		polyethylentereftalát