



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

ANALÝZA SLOŽENÉ SOUSTAVY S RŮZNÝM PODÍLEM PLNIVA

ANALYSIS OF COMPOSITE SYSTÉM WITH DIFFERENT FILLER RATIO

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BEng. MAREK MYDLÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2009

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá vlivem klimatických podmínek na dielektrické vlastnosti kompozitního materiálu (impregnační lak TSA 220S na bázi epoxidové pryskyřice a mletá slída 60.030). Vzorky jsou analyzovány metodou dielektrické relaxační spektroskopie (DRS). Je zkoumán vliv hmotnostního plnění slídy (0, 4, 8 a 16 % slídy), vlhkosti (0, 33, 55, 65, 75 a 95 %) a teploty (23, 30, 40 a 50 °C) na frekvenční závislosti složek komplexní permitivity.

Abstract:

This master's thesis applies dielectric relaxation spectroscopy to analyse impact of climatic changes on dielectric properties of composite material samples (TSA 220S varnish combined with 60.030 mica). Experiments aim to analyse effect of mica composite mass ratio (0, 4, 8 and 16 % of mica), relative humidity (0, 33, 55, 65, 75 and 95 %) and temperature (23, 30, 40 and 50 °C) on complex permitivity as a function of frequency.

Klíčová slova:

Dielektrikum, TSA 220S, dielektrická, relaxační, spektroskopie, DRS, kompozit

Keywords:

Dielectric, TSA 220S, dielectric, relaxation, spectroscopy, DRS, composite system

Bibliografická citace díla

MYDLÁŘ, M. *Analýza složené soustavy s různým podílem plniva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 44 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 29.5.2009

Poděkování

Chtěl bych poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Zdence Rozsivalové a Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady, návrhy a připomínky při realizaci této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 Dielektrika a jejich vlastnosti	11
1.1.1 Relativní permitivita	11
1.1.2 Dielektrická pevnost a průrazné napětí	12
1.1.3 Ztrátový činitel	13
1.1.4 Rezistivita	13
1.2 Polarizace dielektrik	14
1.2.1 Polarizační mechanismy	15
1.2.2 Polarizace dielektrika ve střídavém elektrickém poli	16
1.3 Elektroizolační laky	19
1.3.1 Požadavky na elektroizolační laky	20
1.3.2 Klasifikace elektroizolačních laků	20
1.3.3 Rozpouštědlové laky	21
1.3.4 Bezropouštědlové laky	21
1.4 Dielektrická relaxační spektroskopie	22
1.4.1 Elektroodový systém	23
1.4.2 Coleho – Coleho diagram	26
1.4.3 Havriliakův Negamiho diagram	27
1.5 Vliv teploty	27
1.6 Vliv vlhkosti	28
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
2.1 Charakteristika laku	30
2.2 Charakteristika slídy	30
2.3 Příprava zkušebních vzorků	31
2.4 Kondicionování vzorků	33
2.4.1 Vlhkost prostředí	33
2.4.2 Teplota měření	33
2.4.3 Atmosférické podmínky	33
2.5 Zkušební zařízení	34
2.5.1 RLC metr	34
2.5.2 Elektroodový systém	35
2.5.3 Klimatická komora	36
2.6 Postup měření	36
2.7 Výsledky měření	37
2.8 Vyhodnocení experimentu	45
3 ZÁVĚR	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vztah mezi složkami komplexní permitivity a ztrátovým činitelem	17
Obr. 2 Grafická interpretace komplexní permitivity	18
Obr. 3 Závislost ϵ' a ϵ'' na kruhové frekvenci ($T = \text{konst.}$) [1]	19
Obr. 4 Tříelektrodový rovinný systém [1].....	25
Obr. 5 Tříelektrodový válcový systém [1]	25
Obr. 6 Coleho-Coleho diagramy pro a) jednu a b) více relaxačních dob [1]	26
Obr. 7 RLC metr HP Agilent E4980A	35
Obr. 8 Elektrodotový systém HP Agilent 16451B	35
Obr. 9 Klimatická komora Climacell	36
Obr. 10 Vliv hmotnostního plnění na dielektrické vlastnosti.....	40
Obr. 11 Vliv 0 % plnění a vlhkosti na dielektrické vlastnosti.....	41
Obr. 12 Vliv 16 % plnění a vlhkosti na dielektrické vlastnosti.....	42
Obr. 13 Vliv 0 % plnění a teploty na dielektrické vlastnosti.....	43
Obr. 14 Vliv 16 % plnění a teploty na dielektrické vlastnosti.....	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Relativní permitivita některých materiálů.....	12
Tab. 2 Dipólové momenty některých molekul [5]	15
Tab. 3 Vlastnosti impregnačního laku TSA 220S [8] a slídy 60.030 [11]	30
Tab. 4 Přehled vzorků.....	32
Tab. 5 Přehled exsikátorů a použitého prostředí	33
Tab. 7 Měření navlhých vzorků při určité vlhkosti a teplotě okolí	34
Tab. 7 Nárůst hmotnosti vzorků vlivem navlhání	39

Seznam použitých symbolů

B	[-]	korekční součinitel
C, C_0	[F]	kapacita, geometrická kapacita
C_p	[F]	parazitní kapacita
d_m	[m]	průměr měřic elektrody
D, D_0	[C m ⁻²]	elektrická indukce, ve vakuu
E	[V m ⁻¹]	intenzita výsledného elektrického pole
E_p	[V m ⁻¹]	elektrická pevnost
F	[Hz]	frekvence
G_0	[S]	parazitní vodivost
h	[m]	tloušťka vzorku
j	[-]	imaginární jednotka
k	[J K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta (1,381 · 10 ⁻²³)
n	[m ⁻³]	koncentrace polarizovatelných částic
P	[C m ⁻²]	polarizace (vektor polarizace)
S_{ef}	[m ²]	efektivní plocha
t	[s]	čas
$\text{tg } \delta$	[-]	ztrátový činitel
U	[V]	napětí
V	[m ³]	objem
α	[-]	parametr distribuce relaxačních dob
α_0	[-]	polarizovatelnost částic
β	[-]	parametr asymetrie relaxačních dob
δ	[rad]	ztrátový úhel
ε^*	[-]	komplexní permitivita
ε'	[-]	reálná složka ε^*
ε''	[-]	imaginární složka ε^*
ε_s	[-]	statická permitivita
ε_∞	[-]	optická permitivita
ε_r	[-]	relativní permitivita
ε_0	[F m ⁻¹]	permitivita vakua (8,854 · 10 ⁻¹²)
μ	[D]	dipólový moment
μ_i	[C m]	indukovaný dipólový moment
ω	[rad s ⁻¹]	úhlová rychlost

ÚVOD

Vysoká spolehlivost a bezpečnost jsou v dnešní době zásadními požadavky na provoz elektrických zařízení. Tyto požadavky se díky rozvoji techniky neustále zvyšují. Jedním z faktorů, které výrazně ovlivňují provozní životnost elektrotechnických zařízení, je kvalita elektroizolačního systému (EIS), resp. životnost použitých elektroizolačních materiálů (EIM).

Elektrické zařízení je vystaveno celé řadě vlivů. Tyto vlivy, které se liší dle provozních podmínek, působí na elektrické a mechanické vlastnosti, což má za následek zhoršení výše uvedené spolehlivosti a bezpečnosti daného elektrického zařízení.

Pokud mají zařízení splňovat požadavky na vysokou spolehlivost a bezpečnost, je třeba aby byly při výrobě opatřeny co nejvhodnějšími elektroizolačními materiály. Za tímto účelem jsou vyvíjeny diagnostické metody pro sledování stavu elektroizolačních systémů.

Tato práce je členěna do dvou hlavních částí. Teoretická část popisuje problematiku dielektrik. Experimentální část se zaměřuje konkrétně na studium vlivu teploty, vlhkosti a elektrického pole na vlastnosti elektroizolačního laku TSA 220S.

Elektroizolační lak je ve formě dvousložkového kompozitního materiálu (spolu s mikromletou slídou) vytvarován do vzorků, které jsou následně zkoumány v laboratoři materiálů na ústavu elektrotechnologie.

Vzorky jsou analyzovány nedestruktivní diagnostickou metodou – dielektrickou relaxační spektroskopii.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Dielektrika a jejich vlastnosti

Dielektrikum je izolační (elektricky nevodivý) materiál, např. minerální olej nebo plastická hmota. Dielektrikem je v podstatě izolant, ve kterém může existovat elektrické pole, i přes to, že neobsahuje volné nosiče náboje díky jeho důležité vlastnosti - schopnost polarizace v elektrickém poli.

Každý izolant obsahuje alespoň malé množství volných nosičů náboje, protože ideální izolant neexistuje. O elektrické vodivosti elektroizolačních látek se předpokládá, že je iontového charakteru tzn., že volnými nosiči nábojů jsou ionty. Zpravidla se jedná o ionty příměsí a nečistot. Elektrické vlastnosti dielektrik závisí na skupenství, struktuře, chemickém složení a okolních podmínkách.

Pojem dielektrikum se používá ve vztahu s polarizovatelností částic a následně se schopností látky akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii. Pojem izolant se používá ve vztahu se schopností látky vzájemně izolovat vodivé části s různým potenciálem. Každý izolant je současně dielektrikem, avšak všechna dielektrika nejsou izolanty. K dielektrikům se řadí i čtené látky s vlastnostmi polovodičů (Ge, Si).

Všechny charakteristiky jsou propojeny řadou fyzikálních vztahů a vzájemně se doplňují.

1.1.1 Relativní permitivita

Dielektrikum lze charakterizovat veličinou ϵ_r nebo ϵ' zvanou relativní permitivita. Ta udává, kolikrát vzroste kapacita kondenzátoru, vyplníme-li prostor mezi jeho elektrodami zkoumaným materiálem.

Pokud elektrody umístíme do uzavřené komory, kde vytvoříme vakuum, bude výsledná kapacita kondenzátoru na nejnižší možné míře, protože vakuum má minimální možnou hodnotu relativní permitivity, tj. 1. Znamená to, že vakuum není polarizovatelné.

Tab. 1 Relativní permitivita některých materiálů

MATERIÁL	ϵ_r [-]
vakuum	1
vzduch	1,00054
papír	3,5
transformátorový olej	4,5
slída	5,4
porcelán	6,5
křemík	12
voda	80,4
titaničitá keramika	130

Relativní permitivita sama o sobě není plnohodnotným údajem vypovídajícím o této vlastnosti materiálu - je třeba ji vždy doplnit o popis vnějších podmínek, při kterých byla naměřena, protože ji tyto výrazně ovlivňují.

1.1.2 Dielektrická pevnost a průrazné napětí

Jedná se o fyzikální pojem vyjadřující odolnost materiálů vůči elektrickému poli. Veličinou, která charakterizuje dielektrikum z tohoto pohledu, je průrazné napětí. Je to při dané tloušťce dielektrika nejnižší napětí, při němž nastane elektrický průraz dielektrika. Při průrazu se vytvoří v dielektriku vodivá dráha mezi elektrodami, dielektrikum ztrácí své izolační schopnosti, poškodí se.

Každé dielektrikum má charakteristickou dielektrickou pevnost a ta je rovna maximální intenzitě elektrického pole, při níž ještě k průrazu nedojde. Kondenzátory s vhodným pevným dielektrikem mohou dosahovat vysokých kapacit, ale je to vykoupeno malou elektrickou pevností a dochází snáz k nevratnému dielektrickému průrazu.

Kapalná dielektrika mají tu výhodu, že i když dojde k dielektrickému průrazu, stačí pouze snížit napětí pod kritickou úroveň a látka obnoví své dielektrické vlastnosti.

Elektrická pevnost je popsána vztahem

$$E_p = \frac{U_p}{l}, \quad (1)$$

kde U_p je průrazné napětí a l je tloušťka izolantu v místě průrazu nebo přeskočku. Elektrická pevnost s dobou působení klesá. Čím menší napětí působí na izolant, tím delší doba uplyne než dojde k průrazu.

Elektrická pevnost je ovlivněna řadou činitelů mezi které patří např. teplota či tloušťka izolantu.

1.1.3 Ztrátový činitel

Dielektrické ztráty jsou proces přeměny části elektrické energie na teplo v případě, že se izolační materiál nachází v elektrickém poli. Kromě procesu dielektrického ohřevu je tato přeměna nežádoucí a energie přeměněná na teplo je energií ztrátovou. Množství energie, které se přemění na teplo za jednotku času (výkon) v jednotce objemu (v 1 m^3) nazýváme měrnými dielektrickými ztrátami.

Veličinou, která tento jev popisuje je ztrátový činitel $\text{tg } \delta$, který udává míru ztrát a je přímo spojen se ztrátovým číslem, neboli ε'' . Čím nižší jsou dielektrické ztráty, tím se dá dielektrický materiál nazvat efektivnějším.

Čím větší je ztrátový činitel, tím větší je výkon přeměněný na teplo, tím větší je současně teplota dielektrika, s čímž souvisí proces tepelného stárnutí případně i nebezpečí tepelné destrukce izolantu. Z tohoto důvodu je snaha dielektrické ztráty minimalizovat, a současně zajistit dostatečné chlazení izolantu.

Ztrátový činitel je definován jako poměr relativní permitivity a ztrátového čísla.

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2)$$

a více je o něm pojednáno v kapitole Polarizace dielektrika ve střídavém elektrickém poli.

1.1.4 Rezistivita

Dalšími charakteristikami dielektrik jsou:

- vnitřní rezistivita materiálu ρ_v

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

- povrchová rezistivita materiálu ρ_p

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

Ideální dielektrikum neobsahuje žádné volné nosiče náboje, nemělo by u něj dojít k elektrickému průrazu díky nekonečné hodnotě elektrické pevnosti a vnitřní rezistivity. Tento ideální stav je ale nedosažitelný.

1.2 Polarizace dielektrik

Po přiložení elektrického pole se elektrické náboje dají obecně do pohybu. Pokud se elektrické náboje mohou pohybovat na tak velké vzdálenosti, že překonávají vzdálenosti mezi elektrodami, hovoříme o vodivosti. Pokud se náboje pohybují pouze na malé vzdálenosti, pak se pouze posunou vůči svým původním rovnovážným polohám a dvojice sousedních nábojů opačného znaménka vytvoří elektrický dipól. V takovém případě říkáme, že se jedná o vázané náboje a hovoříme o polarizaci. Může také dojít k situaci, kdy se posune pouze jediný náboj (elektron), zatímco náboj opačného znaménka je pevný (proton). I v takovém případě vzniká elektrický dipól (elektron se posune vůči své původní rovnovážné poloze), a proto i zde hovoříme o polarizaci. [6]

Polarizace je tedy fyzikální jev, při němž se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole přemísťují (posouvají) elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových, na malé omezené vzdálenosti, a obsahuje-li látka dipólové molekuly, natáčejí se tyto do směru pole. Výjimečně jsou i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace. [1]

Základní makroskopickou veličinou pro popis polarizace je makroskopický dipólový moment μ_{celk} [C m] celého materiálu

$$\vec{\mu}_{\text{celk}} = \sum_{\forall i} \vec{\mu}_i \quad (3)$$

kde μ_i je součet indukovaných dipólových momentů všech polarizovaných částic v objemu V , orientovaných ve směru elektrického pole.

Zpravidla se pro charakterizaci polarizace používá veličina polarizace P [C m⁻²], což je lokální objemová hustota dipólového momentu,

$$\vec{P} = \frac{\vec{\mu}_{\text{celk}}}{V} \quad (4)$$

Mírou polarizace v látce je vektor polarizace P [C m⁻²] a relativní permitivita ϵ' [-].

$$\vec{P} = n \vec{\mu}_i = n \alpha_0 \vec{E}_{\text{lok}} \quad (5)$$

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V} \quad (6)$$

Polarizovatelnost α vyjadřuje schopnost polarizace látky; je základní fyzikální vlastností dielektrik. S polarizovatelností souvisí permitivita ϵ' . [1]

Dielektrika rozdělujeme na:

- polární, která mají permanentní elektrické dipólové momenty a tyto elektrické dipóly se natácejí do směru vnějšího elektrického pole

- nepolární, která nezávisle na tom, zda mají či nemají permanentní dipólové momenty, získávají molekuly umístěné do vnějšího elektrického pole indukované dipólové momenty μ_i .

$$\vec{\mu}_i = \alpha \cdot \vec{E}_{lok} \quad (7)$$

Směr elektrického pole dipólu má opačný směr než polarita vnějšího elektrického pole. Výsledné napětí je tedy jejich rozdílem.

V případě, kdy dielektrikum obsahuje pouze permanentní dipólové momenty, pak jsou tyto dipóly přítomny v dielektriku i při absenci elektrického pole a každý z nich vykazuje nenulový elektrický dipólový moment. Dipóly jsou však bez přítomnosti elektrického pole orientovány náhodně, eventuálně kmitají kolem svých rovnovážných poloh, které jsou rozloženy náhodně, a vektorový součet jejich dipólových momentů je roven nule [5]

$$\sum_i \mu_i = 0 \quad (8)$$

Tab. 2 Dipólové momenty některých molekul [5]

Molekula	H ₂ O	HF	HCl	HBr	HI	CO	CO ₂	NH ₃	PH ₃	AsH ₃	CH ₄	NaCl
μ [D]	1,85	1,91	1,08	0,80	0,42	0,12	0,00	1,47	0,58	0,20	0,00	9,00

Poměr intenzity E_0 vnějšího elektrického pole k intenzitě výsledného elektrického pole E udává relativní permitivita dielektrika ϵ_r .

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E} \quad (9)$$

1.2.1 Polarizační mechanismy

V dielektrických látkách se často vyskytuje současně několik druhů polarizací, přičemž slabší z nich bývají překryty mechanismy silnějšími. Zpravidla se rozlišují:

- Jevy s rychlým průběhem, tzv. pružné (elastické) polarizace. Vyznačují se krátkou dobou trvání, proběhnou prakticky okamžitě, pružně a bez ztrát energie. Dochází při nich jen k pružnému posunutí nábojů. Za okamžitou reakci můžeme považovat takovou reakci, která

proběhne rychleji, než je námi zvolená rychlost snímání odezvy, tj. z hlediska praktické elektrotechniky méně než cca 10^{-10} s. [6]

• Jevy s pomalým průběhem, tzv. relaxační polarizace. V souvislosti s dielektrickou polarizací se v mnoha případech vyskytuje pojem relaxace či jako přídavné jméno relaxační. Relaxace je obecně definována jako opožděná reakce nějakého systému na změnu sil, které na daný systém působí. Relaxační je tedy takový jev, který probíhá pomaleji, než jeho příčina.

Klasifikace polarizačních mechanismů:

Polarizace rychlé (pružné)

- iontová
- elektronová

Polarizace pomalé (relaxační)

- iontová (relaxační)
- dipólová

Polarizace zvláštní

- mezivrstvová (migrační) - rychlá
- samovolná (spontánní) - pomalá
- rezonanční – rychlá
- trvalá (permanentní) – pomalá

1.2.2 Polarizace dielektrika ve střídavém elektrickém poli

Polarizační děje jsou charakterizovány permitivitou, která je konstantou úměrnosti mezi vektorem intenzity elektrického pole E a vektorem elektrické indukce D . Permitivita udává, kolikrát je indukce v dielektriku větší než ve vakuu.

Pro popis chování dielektrika ve střídavém elektrickém poli budeme nejdříve vycházet ze vztahu, kterým je vyjádřena elektrická indukce pro vakuový kondenzátor ve stejnosměrném elektrickém poli (dielektrikem je vakuum):

$$\vec{D}_0 = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (10)$$

Pokud vložíme do takového kondenzátoru dielektrikum (dielektrikem není vakuum, ale jiný materiál), zvýší se nám hustota náboje na elektrodách kondenzátoru, což se projeví zvýšením elektrické indukce D oproti hodnotě indukce vakuového kondenzátoru D_0 .

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (11)$$

Permitivita charakterizuje polarizační děje, jelikož působí jako koeficient o který je elektrická indukce relativně větší než intenzita elektrického pole.

$$\vec{D} = \varepsilon' \varepsilon_0 \vec{E} \quad (12)$$

Při polarizaci střídavým elektrickým polem dochází ke zpoždování elektrické indukce za intenzitou elektrického pole v důsledku dielektrické relaxace.

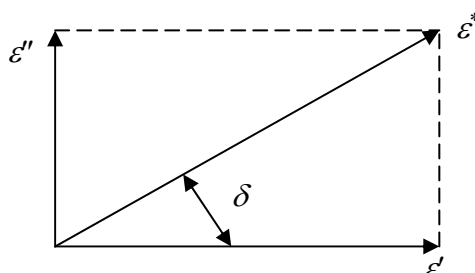
$$\hat{D}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon^*(\omega) \hat{E}(\omega), \quad (13)$$

kde ε^* je komplexní permitivita a ω je úhlová frekvence.

Pro komplexní permitivitu platí

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (14)$$

kde ε' a ε'' jsou frekvenčně závislé reálná a imaginární část komplexní permitivity (důvodem záporného znaménka je smysl otočení a vzájemný posun vektorů intenzity elektrického pole a elektrické indukce). ε' udává míru polarizace a ztrátové číslo ε'' udává míru ztrát v elektrickém poli.

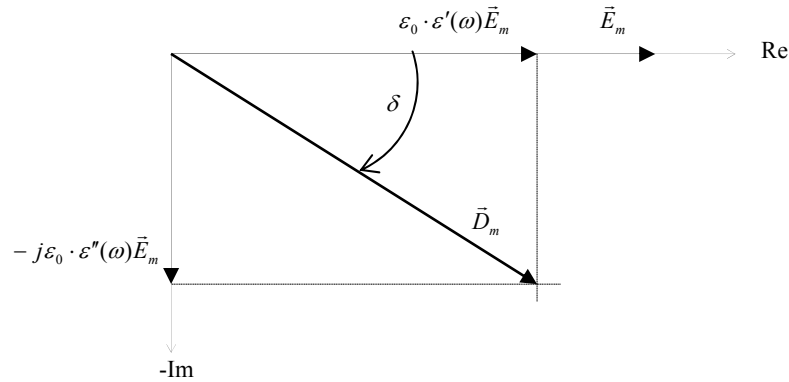


Obr. 1 Vztah mezi složkami komplexní permitivity a ztrátovým činitelem

Ztrátový činitel je definován jako poměr relativní permitivity a ztrátového čísla.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (15)$$

Úhel δ je úhel, o který se zpožďuje elektrická indukce D oproti intenzitě elektrického pole E . Složky komplexní permitivity a vektory E a D lze graficky znázornit následovně.



Obr. 2 Grafická interpretace komplexní permitivity

Pokud dielektrikum neobsahuje permanentní elektrické dipóly, tj. je nepolární, nemá komplexní permitivita takového dielektrika imaginární část.

V opačném případě, tedy pokud dielektrikum obsahuje permanentní elektrické dipóly, tj. je polární a působí na něj střídavé elektrické pole, reaguje dielektrikum na změnu polarity se zpožděním. Toto zpoždění se nazývá dielektrická relaxace a poprvé jej matematicky odvodil Paul Debye.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (16)$$

Kde τ je relaxační doba polarizace (čas, za který poklesne vektor polarizace na $1/e$ své původní hodnoty), která je závislá na teplotě a nezávislá na čase, ε_s je tzv. statická permitivita (ε' pro $f \rightarrow 0$) a ε_∞ je tzv. optická permitivita (ε' pro $f \rightarrow \infty$).

Debyeho rovnice respektuje pouze jednu relaxační dobu. To znamená, že tato rovnice platí pouze pro jeden mechanismus polarizace s jednou zcela konkrétní relaxační dobou. Rozdělením na reálnou a imaginární část dostaneme

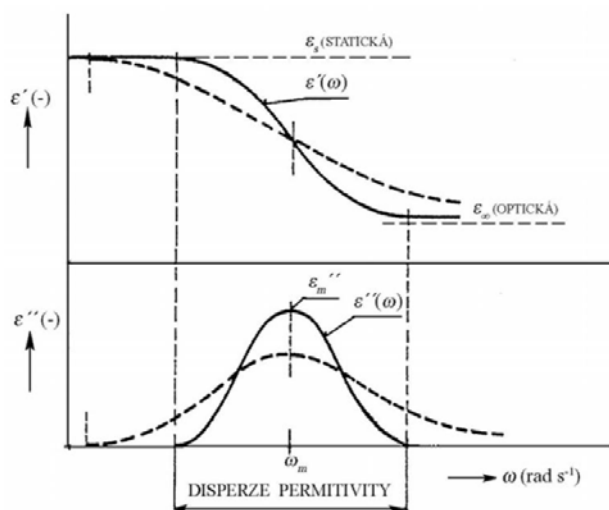
$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (17)$$

a

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (18)$$

Úpravou získáme výraz pro ztrátový činitel, který respektuje pouze polarizační ztráty:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2} \quad (19)$$



Obr. 3 Závislost ϵ' a ϵ'' na kruhové frekvenci ($T = \text{konst.}$) [1]

Z obrázku je vidět, že ϵ' s rostoucí frekvencí klesá z nejvyšší hodnoty ϵ_s (statické) na nejnižší hodnotu ϵ_∞ (optickou). Závislost $\epsilon'' = F(\omega)$ prochází maximem při frekvenci ω_m odpovídajícím inflexnímu bodu závislosti $\epsilon' = F(\omega)$. Dielektrické ztráty mizí při limitních frekvencích $\omega \rightarrow 0$ a $\omega \rightarrow \infty$, kdy se technický kondenzátor chová jako ideální (bezeztrátový) kondenzátor. Oblast, ve které permitivita klesá s frekvencí, se označuje jako dielektrická disperze.

1.3 Elektroizolační laky

Jejich hlavním úkolem je vyplnění všech volných míst v izolaci elektrotechnických zařízení při jejich impregnaci. Tím se zvýší elektrická pevnost, zlepší tepelná vodivost izolace a vytvoří se suchý lakový povlak neboli film na povrchu.

Elektroizolační laky, požadavky na aplikaci a zkušební metody jsou blíže specifikovány v příslušných normách, konkrétně ČSN EN 60464-1 (Elektroizolační laky - Část 1: Definice a všeobecné požadavky), ČSN EN 60464-2 (Elektroizolační laky - Část 2: Zkušební metody) a ČSN EN 60464-3 (Elektroizolační laky - Část 3: Specifikace jednotlivých materiálů).

V elektroizolační technice mají laky značný význam, jak pro jednotlivé části, tak i pro celé soustavy elektroizolačních zařízení. Lak izoluje vodiče, plechy, papír, tkaniny, impregnuje vinutí elektromotorů, transformátorů a jiných elektrotechnických zařízení, dále na tmelení, pouzdření v elektrotechnice.

Lak je při aplikaci kapalný a následným vytvrzením se přivede do stavu tuhého, ve kterém dosahuje vynikajících mechanických a elektrických vlastností a také vykazuje vysokou trvalou teplotní odolnost.

Sušení neboli tzv. vytvrzování laků se děje různými pochody. U některých laků se tvoří pevný film čistým odpařením rozpouštědel (laky lihové), u jiných dochází k vytvrzení oxidací, kdy přijímaným kyslíkem nastává prostorové zesíťování lineárních makromolekul (laky olejové). U dalších laků dochází při zvýšené teplotě popř. i zvýšeném tlaku k zesíťování čistou polymerizací, popř. polykondenzací (např. laky fenolické). Poslední skupinou jsou laky, u kterých dochází k vytvrzení polyadící i polymerizací pryskyřice s přidaným tvrdidlem, tzv. laky bezrozpouštědlové (nenasycené polyestery nebo epoxidové pryskyřice).

1.3.1 Požadavky na elektroizolační laky

Vyznačují se krátkým časem vytvrzování, časově neomezenou zpracovatelností, odolností vůči freonům, rozpouštědlům, transformátorovému oleji a radioaktivnímu záření. Dále se vyznačují malým množstvím emisí bez negativního vlivu na životní prostředí.

Aby izolační lak splňoval požadavky, musí vykazovat dobré mechanické, chemické i elektrické vlastnosti.

Před použitím musí mít dostatečnou skladovatelnost, musí mít odpovídající viskozitu, dobrou smáčivost a nesmí být jedovatý.

Při aplikaci je důležité, aby pronikl až do hloubky a prosytil tak celý objem jakkoli tlusté izolace v co nejkratším čase. Mechanické zpevnění musí být zajištěnou kvalitní lepivostí v celém objemu vinutí. Zároveň je nezbytné, aby lak nereagoval s izolovaným vinutím a jeho izolací a nesmí napadat kovy.

Při vytvrzování se oceňuje zejména krátká doba vytvrzování.

Po vytvrzení pak má mít lakový film dobrou tepelnou vodivost, vysokou rezistivitu, malé dielektrické ztráty, velkou elektrickou pevnost, dostatečnou odolnost proti oděru a proti rozpouštědlům. Musí být také odolný proti dlouhodobému působení vlhkosti, málo navlhavý a nasákavý, což omezí difúzi na minimum.

1.3.2 Klasifikace elektroizolačních laků

Podle použití jsou laky rozděleny na:

- laky impregnační
- laky a emaily povrchové
- laky na dráty
- laky na kabely a vodiče
- laky na tkaniny a rourky

- laky lepicí.

Rozdělení podle vlastního základu samotného laku pak zahrnuje:

- laky olejové
- syntetické
- lihové
- celulózové
- deriváty kaučuku [3].

1.3.3 Rozpouštědlové laky

Izolační lak je vlastně roztokem tekutých i pevných látek v rozpouštědlech, které po jejich odpaření vytvoří pevný lakový film. Vhodné hustoty laků se dosahuje ředidly, což jsou však ponejvíce látky podobné rozpouštědlům (přírodní syntetické pryskyřice, termoplastické polymery, asfalty a rostlinné oleje). V menší míře jsou v lacích obsaženy i zvláčňovadla neboli změkčovadla (plastifikátory), urychlovače (sikativy), umožňující rychlejší zasychání laků, a někdy i pigmenty dodávající laku určitou barvu.

Rozpouštědla a ředidla představují jen neaktivní složky laků. Jsou však důležité při jejich přípravě. Z technologického hlediska je důležitá viskozita laků, která je závislá na obsahu filmotvorných složek, struktuře, molekulové hmotnosti, povaze makromolekul a obsahu rozpouštědel a ředidel.

Impregnace se provádí zpravidla kontinuálním nebo diskontinuálním máčením při zvýšeném tlaku, ve vakuu, při rotaci a zakapáváním. [4]

1.3.4 Bezrozpouštědlové laky

Bezrozpouštědlové laky neobsahují rozpouštědla. Jsou složeny jen z filmotvorných látek, které se vytvrzují polymeračními reakcemi bez oddělování těkavých složek. Filmotvorné látky jsou převážně syntetické pryskyřice - epoxidy, polyestery, polyuretany, silikony s různými modifikujícími látkami a tvrdidly, někdy obsahují i monomery, jež se označují jako reaktivní rozpouštědla (snižují viskozitu laku), avšak na rozdíl od neaktivních rozpouštědel reagují s ostatními složkami a zabudovávají se do struktury lakového filmu.

Bezrozpouštědlové laky jsou jednosložkové nebo dvousložkové (vícesložkové). Jednosložkové obsahují síťovací činidla, do vícesložkových se síťovací činidlo přimísí těsně před použitím.

Po přidání síťovacího činidla (tvrdidla, katalyzátoru, iniciátoru) jsou nestabilní a je nutné v omezeném čase je zpracovat. Protože neobsahují žádné těkavé látky, je obsah sušiny téměř

100 % a při jedné impregnaci se zaplní prakticky celý impregnovaný prostor. To je hlavní výhoda oproti lakům rozpouštědlovým.

Dalšími výhodami jsou kratší časy impregnačního procesu, lakový film nemůže být znehodnocen unikajícími parami rozpouštědla, není nebezpečí požáru. Nevýhody jsou v omezené době skladovatelnosti i při snížených teplotách, citlivosti na teplo, vlhkost, světlo v době skladování, a v neposlední řadě vyšší cena, která ovšem v celkové kalkulaci může být vyvážena úsporami energie a pracností. [4]

1.4 Dielektrická relaxační spektroskopie

Relaxace je obecně definována jako opožděná reakce nějakého systému na změnu sil, které na daný systém působí. Relaxační je tedy takový jev, který probíhá pomaleji než jeho příčina.

Dielektrická relaxace je pomalá odezva zkoumaného materiálu na působení vnějšího elektrického pole. Vztahuje se na reakci dipólů vystavených elektrickému poli. [5]

Spektroskopie je fyzikální obor zabývající se vznikem a vlastnostmi spekter. Je to metoda založená na interakci elektromagnetického záření se vzorkem [5]

Těžištěm zájmu dielektrické relaxační spektroskopie je získání závislosti komplexní permitivity $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ na frekvenci a zároveň i dalších parametrech. V pásmu radiotechnických frekvencí se používají dvě metody DRS, v časové a frekvenční oblasti. [6]

Podle doby trvání rozlišujeme polarizace pružné a relaxační. Pomalé polarizace jsou značně závislé na teplotě, provází je ztráty energie v dielektriku.

Změny polarizace v dielektriku můžeme sledovat také tak, že dielektrikum vložíme do kondenzátoru a pozorujeme náboj, vytvářející se na svorkách kondenzátoru, či přímo nabíjecí nebo vybíjecí proud protékající vnějším obvodem. Pro náboj na svorkách kondenzátoru, ať již s dielektrikem nebo bez něj, platí [6]:

$$Q(t) = S D(t) \quad (20)$$

Elektrický proud protékající obvodem je roven časové změně náboje na svorkách kondenzátoru (nebudeme rozlišovat, zda sledujeme zkratový proud nebo změnu náboje naprázdno) a platí

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = S \frac{dD}{dt} = \varepsilon_0 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) E_0 S \frac{d\Phi}{dt} \quad (21)$$

Princip spočívá v transformaci funkcí odezvy ve funkci poklesu a následně v komplexní permitivitě.

Studovaný materiál plní funkci dielektrika, které je vloženo do vnějšího stejnosměrného elektrického pole. V časové oblasti se sledují nabíjecí a vybíjecí proudy kondenzátoru. Ve frekvenční oblasti se pomocí dielektrická relaxační spektroskopie sledují odezvy částic v závislosti na změnu frekvence. Pro posouzení vlastností zkoumaného materiálu je vhodné sledovat jeho chování při různých vlhkostech a teplotách.

1.4.1 Elektrodotový systém

Měření základních elektrických vlastností tuhých a kapalných izolantů, jako jsou relativní permitivita a ztrátový činitel se převádí na určení prvků ekvivalentního náhradního schématu kondenzátoru, jehož dielektrikem je zkoumaný vzorek.

Měřicí kondenzátor mohou tvořit přiložené nebo na povrch vzorku nanesené elektricky dobře vodivé rovinné elektrody, pro měření na kapalinách jsou měřicí kondenzátory zpravidla ve tvaru vhodné měřicí nádoby [1].

Dělení elektrod

- podle způsobu realizace

Podle způsobu realizace se rozlišují dvě hlavní skupiny elektrodotových systémů. Prvou skupinu tvoří elektrodotové systémy příložené, k nimž se řadí i elektrody přitlačné a elektrody vytvořené kovovými fóliemi. Speciální skupina jsou bezdotykové elektrody.

1. Přiložené elektrody

Jedná se v podstatě o elektrody s mezivrstvou, neboť mezi vzorkem a elektrodami je vlivem jejich konečné drsnosti vždy tenká vrstva vzduchu, která ovlivní výsledky měření. Mezivrstva vzduchu způsobuje, že naměřená kapacita, a tedy i vypočtená relativní permitivita, je vždy menší než skutečná kapacita odpovídající vzorku.

Chyba měření se zvětšuje s klesající tloušťkou vzorku; výrazná je při řádově stejných tloušťkách. Je tedy nutno měřit na dostatečně tlustých vzorcích, aby chybu bylo možné zanedbat.

2. Elektrody vytvořené kovovými foliemi

Druhou skupinu představují elektrodotové systémy vytvářené bezprostředně na povrchu vzorků. Sem patří elektrody z vodivých nátěrů, elektrody vpalované, nanášené stříkáním roztaveného kovu a kovové elektrody napařované ve vakuu.

Elektrody nanášené na povrch vzorku mají dobrý kontakt s povrchem měřeného materiálu, naměří se tedy skutečná kapacita a ztrátový činitel (při malém elektrickém odporu vrstvy). Přesto je výpočet relativní permitivity zatížen systematickou chybou, neboť geometrická kapacita C_0 stanovená z rozměrů vzorku je vždy menší než jaká by odpovídala nerovnému povrchu vzorku.

Vypočítaná relativní permitivita je tedy vždy větší než skutečná. Chyba je tím větší, čím tenčí jsou vzorky a čím je povrch vzorků drsnější.

3. Bezdotykové elektrody

Zvláštní skupinu elektrod tvoří tzv. bezdotykové elektrody. Nejedná se o jiný druh elektrodového systému v pravém slova smyslu, ale o aplikaci přítlačného mikrometrického měřicího kondenzátoru.

Měřený vzorek je volně vložen mezi desky kondenzátoru, které mají nastavenou větší vzdálenost než je tloušťka vzorku. Tím se vytvoří mezi oběma elektrodami a vzorkem vzduchová mezera definovaná tloušťkou. Měřená soustava představuje sériově zapojené kondenzátory se vzduchovým a měřeným dielektrikem.

Jde tedy o složenou soustavu izolant - vzduch; relativní permitivita i ztrátový činitel vzorku se vypočítají z naměřených hodnot za pomoci směsných vztahů. Toto uspořádání má velkou výhodu v tom, že není nutno nanášet na vzorek elektrodový systém, mezivrstva vzduchu je funkční a je zahrnuta ve výpočtu.

Bezdotykovými elektrodami se relativní permitivita stanovuje obvykle metodou substituční, která vylučuje vliv drsnosti elektrod, vzorku a parazitních kapacit.

- podle počtu elektrod

Podle počtu elektrod se rozlišují tříelektrodové a dvouelektrodové systémy.

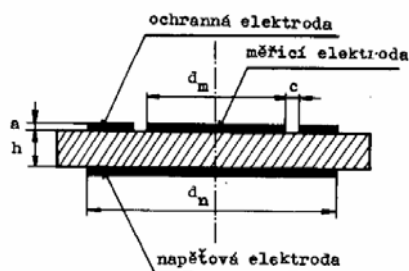
1. Tříelektrodový systém

Tříelektrodový rovinný systém je tvořen dvěma elektrodami kruhového tvaru – měřicí a napěťovou – a třetí, ochrannou elektrodou ve tvaru mezikruží.

Základní uspořádání tříelektrodového systému je na obr. 4.

Použití ochranné elektrody snižuje vliv okrajové a zemní kapacity měřicí elektrody a vylučuje vliv povrchového svodu na výsledek měření. Efektivnost ochranné elektrody je tím

větší, čím menší je mezera a rozdíl potenciálů mezi měřicí a ochrannou elektrodou.



Obr. 4 Tříelektrokový rovinný systém [1]

Pro rozměry elektrodového systému platí doporučení - normy. Šířka ochranné elektrody nesmí být menší než dvojnásobek tloušťky vzorku a mezera mezi ochrannou a měřicí elektrodou má být co nejmenší. Průměr napěťové elektrody nesmí být menší než vnější průměr ochranné elektrody.

Geometrická kapacita C_0 tříelektrodeového systému je

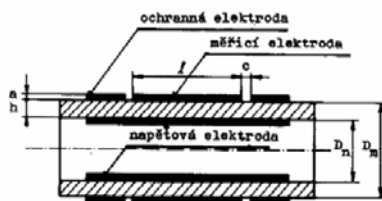
$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S_{ef}}{h} \quad (22)$$

kde efektivní plocha měřicí elektrody je

$$S_{ef} = \pi \frac{(d_m + B \cdot c)^2}{4} \quad (23)$$

Součinitel B v (2.54) je pro tloušťku elektrod $a < h$ roven jedná.

Tříelektrodeový válcový systém pro měření vzorků tuhých izolantů ve tvaru trubek je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Tříelektrodeový válcový systém [1]

2. Dvouelektrodeový systém

Dvouelektrodeový systém se používá pro měření při vyšších frekvencích, kdy použité rezonanční metody při měření ε_r a $\text{tg } \delta$ nedovolují připojení ochranné elektrody. Při vyšších

frekvencích klesá podíl vodivostních ztrát; většinou jej lze zanedbat, takže povrchová vodivost vzorku se nemůže rušivě uplatnit.

Pro dvouelektrodový systém se doporučuje rovinné uspořádání elektrod kruhového tvaru nebo válcové uspořádání. Pro rozměry kruhových elektrod platí stejná řada doporučených průměrů jako pro tříelektrodový systém. [1]

1.4.2 Coleho – Coleho diagram

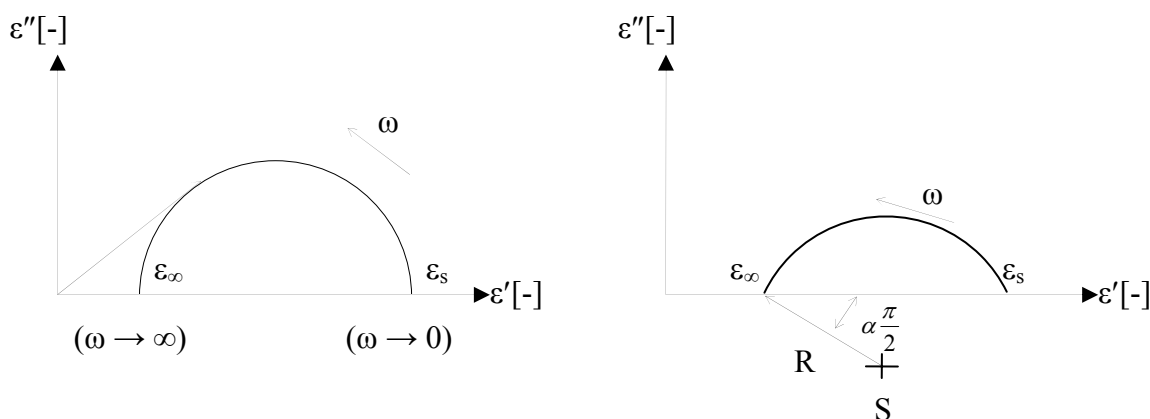
Dielektrickou relaxaci lze popsat několika různými empirickými funkcemi. Tvary jednotlivých rozdělí, které byly při experimentálním studiu dielektrické relaxace pozorovány, jsou v různých systémech až na výjimky, podobné, a proto bylo předloženo několik různých empirických funkcí. Vycházejí z experimentálně zjištěných průběhů vybíjecího či nabíjecího proudu v závislosti na čase anebo složek komplexní permitivity v závislosti na frekvenci.

Paul Debye teoreticky odvodil pro komplexní permitivitu dielektrik za předpokladu jedné relaxační doby vztah [1]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (24)$$

Grafickým zobrazením komplexní permitivity je Cole - Coleův diagram se středem na ose ε' . Tento diagram vyjadřuje vztah obou složek komplexní permitivity. Po úpravě Debyeho rovnic dospějeme k rovnici

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 \quad (25)$$



Obr. 6 Coleho-Coleho diagramy pro a) jednu a b) více relaxačních dob [1]

Kružnice má poloměr $r = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}$ a souřadnice středu $S = \left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}; 0 \right]$.

Coleho - Coleho kruhový diagram klasického Debyeova mechanismu vyhovuje jen pro malý počet dielektrik. Coleho-Coleho kruhový diagram lze nicméně sestavit pro polarizační mechanismy s jednou i více relaxačními dobami (skupiny polárních molekul se mohou lišit v relaxačních dobách). Změní se střed kruhového oblouku - vertikálně se posune pod osu reálných hodnot. Hodnoty ε' a ε'' vynesené v komplexní rovině vyplňují kruhový oblouk, který protíná reálnou osu ε' v bodech ε_s a ε_∞ .

Pro tento případ zavedli Cole a Cole empirický vztah

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (26)$$

Pro případ více relaxačních dob se používá empirický vztah v němž figuruje α jako distribuční parametr, který je frekvenčně nezávislý a určuje šířku distribuce relaxačních dob.

1.4.3 Havriliakův Negamiho diagram

U mnoha reálných dielektrik není však výše zmíněná závislost popsána částí kruhového oblouku. Křivka vykazuje jistou nesymetrii. Z toho důvodu upravili Havriliak a Negami Coleho - Coleho vztah zavedením činitele β , takže je možno psát [1]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left[1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}\right]^\beta} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (27)$$

kde β je činitel, který charakterizuje asymetrii.

1.5 Vliv teploty

Vliv teploty se může při působení na elektrotechnické materiály a elektrická zařízení projevit [7]

- vysokou teplotou
- nízkou teplotou
- rychlými změnami teplot.

a) Vysoká teplota

Účinky a důsledky

- mění elektrické a jiné vlastnosti materiálů
- urychluje stárnutí organických materiálů, především izolantů tepelně namáhaných

- způsobuje měknutí termoplastů, zalévacích látek a tmelů s nízkým bodem měknutí, vytékání kabelových koncovek aj.

b) Nízká teplota

Charakteristika

- je převládajícím činitelem klimatu v oblastech studeného podnebí (F).

Účinky a důsledky

- mění elektrické a mechanické vlastnosti materiálů, zejména izolantů makromolekulární povahy
- vzrůstá vnitřní rezistivita izolantů (i u silně navlhých), zatímco elektrická pevnost se obvykle podstatně nemění
- s poklesem teploty klesá pružnost látek, které tím tvrdnou
- vzrůstá pevnost v tahu, klesá však tažnost a tím u některých látek i odolnost proti rázovému namáhání
- dochází k objemovým změnám následkem
 - teplotní kontrakce
 - intenzivního vysoušení materiálů s důsledkem popraskání povrchu, uvolnění spojení, příkladně plastu s kovem.

c) Rychlé změny teplot

Účinky a důsledky

- mění se prudce elektrické a mechanické vlastnosti materiálů, zejména izolantů
- mohou se podstatně změnit elektrické parametry nevhodně konstruovaných součástek
- může docházet k náhlým změnám objemů.

1.6 Vliv vlhkosti

Vliv vlhkosti vzduchu se může při působení na elektrotechnické materiály a elektrická zařízení projevovat

- velkou vlhkostí
- malou vlhkostí
- rychlými změnami vlhkosti.

Množství vodních par ve vzduchu (nebo v jiném plynu) vyjadřuje hodnota

- absolutní vlhkosti vzduchu (prostředí)

- relativní vlhkosti vzduchu (prostředí) - má rozhodující vliv na navlhávání látek.

a) Velká vlhkost vzduchu

Účinky a důsledky

- podstatně se zhoršují elektrické, mechanické a chemické vlastnosti většiny materiálů, především izolantů následkem navlhávání
- navlhávání je často provázeno bobtnáním, které se vlivem vyšších teplot urychluje
- způsobené destrukce bývají spojeny se změnou rozměrů a tvarů součástí a dílů, vznikem trhlinek a puchýřků a obecně zhoršením mechanických vlastností
- snižuje se povrchová rezistivita (adsorpcí vody na povrchu látek) i vnitřní rezistivita (urychlenou difuzí vodních par), vzrůstá ztrátový činitel a klesá elektrická pevnost
- chemické změny se projevují urychlenou korozí kovů a izolantů (plastů, laků), kdy se vedle vysoké vlhkosti může uplatnit i znečištění ovzduší.

b) Malá vlhkost vzduchu

Účinky a důsledky

- vysychání některých materiálů, které je často provázeno objemovými změnami, deformací tvarů, změnami mechanických vlastností.

c) Rychlé změny vlhkosti vzduchu

Charakteristika

- projevují se hlavně deště, rosy nebo mlhy, často za spolupůsobení změn teploty.

Účinky a důsledky

- podstatně se zhoršují elektrické, mechanické a chemické vlastnosti většiny materiálů, především izolantů (viz výše)
- značně se zhoršují zejména povrchové vlastnosti látek a urychluje se koroze, koroze se projevuje u kovů i u izolantů
- může docházet i k hromadění vody v uzavřených dutinách výrobků nebo v pórech izolačních systémů.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Charakteristika laku

Impregnační lak TSA 220S je jednosložková čirá epoxidová pryskyřice jantarové barvy. Typ S označuje lak se sníženou viskozitou oproti laku TSA 220, což umožňuje zpracování bez předehtání pryskyřice. Aplikovat lze pro technologické procesy trakčních motorů v rámci tepelné třídy 220. Skladování je možné v pevně uzavřené nádobě při teplotách pod 25 °C.

Tab. 3 Vlastnosti impregnačního laku TSA 220S [8] a slídy 60.030 [11]

Lak TSA 220S			
Veličina	Hodnota	Jednotka	Poznámka
Viskozita	5000	mPa . s	při 25 °C
	500	mPa . s	při 50 °C
Hustota	1,18	g cm ⁻³	
Poměr ve směsi	jednosložková		
Doba gelovatění	6	minut	při 165 °C
Doba potřebná pro vytvrzení	12	hodin	při 165 °C
Tepelná třída	220	°C	
zeskelnění	150	°C	
TCE	50 . 10 ⁻⁶	K ⁻¹	
Tepelná vodivost	0,21	W mK ⁻¹	
Zápalnost	-	-	
Absorpce vody	12	%	při 23 °C
Dielektrická pevnost	260	kV cm ⁻¹	
Dielektrická konstanta	3,6	-	při 20 °C
Ztrátový činitel	0,003	-	při 20 °C
Měrný objemový odpor	1013	Ω cm ⁻¹	
Slída 60.030			
Veličina	Hodnota	Jednotka	Poznámka
Velikost částic	0,25	mm	
Obsah vlhkosti	max. 3	%	
Obsah železných částic	max. 0,002	%	
Velikost částic	0,8	mm	
Obsah vlhkosti	max. 3	%	
Obsah železných částic	max. 0,002	%	

2.2 Charakteristika slídy

Mletá slída 60.030 je nerostná surovina vyrobená mletím slídy nebo slídových odpadů (muskovit) na velikost částic 0,25 mm nebo 0,80 mm. Mletá slída neobsahuje vodivé částice ani organické příměsi. Odmagnetovaná mletá slída se používá jako plnivo materiálů

používaných v elektrotechnickém průmyslu. Její skladovatelnost je za normálních podmínek prakticky neomezená. [11]

2.3 Příprava zkušebních vzorků

Pro přípravu vzorků bylo využito vybavení laboratoří Ústavu elektrotechnologie. Do PTFE forem ve tvaru rotačního komolého kužele byla vneseno přesné množství směsi laku a mikromleté slídy pomocí injekční stříkačky.

Poměr složek vychází z požadavku na vytvoření několika sad vzorků s různým plněním slídou. Bylo tak vytvořeno 5 sad po 6 vzorcích. Jednotlivé sady mají plnění: 0 %, 4 %, 8 %, 12 % a 16 % mleté slídy.

Následně byly vzorky tvrzeny v souladu s materiálovým listem elektroizolačního laku TSA 200S a jako parametry vytvrzení byly nastaveny teplota a doba vytvrzování. Lak byl vytvrzován po dobu 12 hodin při teplotě 165 °C a po uplynutí této doby byly vzorky po vychlazení vyjmuty z pece.

Byla provedena kontrola stavu nanesené vrstvy přičemž byla zjištěna nutnost upravení povrchu vzorků vzhledem k parazitním vzduchovým kapacitám, které by za daného stavu hrály významnou roli při měření. Jako metoda povrchové úpravy bylo zvoleno broušení pomocí smirkových papírů počínaje velkou hrubostí až po jemné dobroušení.

Vzorky byly zváženy pomocí elektronické laboratorní váhy WPS 360/C/2, které jsou přímo určeny pro přesné a rychlé vážení mají rozlišovací schopnost 0,001 g. Tloušťka vzorků byla změřena opakovaně na různých místech pomocí digitálního mikrometru.

Tab. 4 Přehled vzorků

plnění	vzorek	tloušťka	relativní vlhkost prostředí					
			0 %	33 %	55 %	65 %	75 %	95 %
			hmotnost					
[%]	[-]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	1	2,514	8,565	8,592	8,616	8,630	8,649	8,684
	2	3,200	11,625	11,656	11,682	11,694	11,718	11,771
	3	2,495	9,196	9,228	9,250	9,261	9,282	9,324
	4	3,186	11,433	11,468	11,488	11,498	11,528	11,584
	5	2,783	9,656	9,693	9,712	9,725	9,750	9,791
4	1	2,516	9,154	9,191	9,210	9,223	9,245	9,284
	2	2,707	9,474	9,511	9,526	9,541	9,564	9,605
	3	2,330	8,467	8,494	8,519	8,528	8,553	8,592
	4	2,189	7,815	7,841	7,866	7,874	7,893	7,930
	5	2,077	7,352	7,375	7,404	7,409	7,427	7,466
	6	2,442	8,811	8,834	8,863	8,871	8,894	8,934
8	1	2,930	10,955	10,978	11,008	11,019	11,046	11,102
	2	2,467	8,902	8,927	8,955	8,963	8,993	9,029
	3	2,636	9,783	9,805	9,834	9,844	9,868	9,922
	4	2,859	11,013	11,036	11,064	11,075	11,101	11,162
	5	2,584	9,483	9,504	9,531	9,539	9,566	9,615
	6	2,493	9,084	9,108	9,135	9,144	9,169	9,214
12	1	2,267	8,137	8,162	8,189	8,197	8,218	8,262
	2	2,352	9,176	9,194	9,223	9,233	9,256	9,308
	3	3,101	11,794	11,815	11,841	11,853	11,882	11,947
	4	2,565	9,517	9,534	9,561	9,572	9,596	9,650
	5	2,859	10,990	11,011	11,041	11,053	11,077	11,142
	6	2,855	10,711	10,734	10,761	10,773	10,797	10,863
16	1	2,312	8,405	8,438	8,458	8,465	8,487	8,535
	2	3,347	13,155	13,184	13,207	13,218	13,246	13,316
	3	2,656	10,161	10,193	10,213	10,223	10,249	10,307
	4	3,173	12,639	12,664	12,692	12,702	12,731	12,800
	5	2,793	10,738	10,764	10,791	10,802	10,828	10,888

2.4 Kondicionování vzorků

2.4.1 Vlhkost prostředí

Zkušební vzorky byly postupně vystavovány prostředím o různé relativní vlhkosti. Takto byly proměřeny hodnoty vzorků ve vlhkostech 0 až 95 %. Těchto vlhkostí bylo dosaženo v exsikátorech s rozdílným prostředím. Předepsaná relativní vlhkost byla vytvořena nasyceným roztokem odpovídající soli (tab. 5). Interval mezi měřeními jednotlivých vlhkostí byl vždy minimálně týden, zpravidla však dva týdny.

Zkušebními vzorkům byl tedy dopřán dostatek času na to, aby se vliv vlhkosti při měření projevil v co největší míře.

Tab. 5 Přehled exsikátorů a použitého prostředí

Vlhkost	Prostředí
0%	molekulové síto
33%	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
55%	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
65%	NH_4NO_3
75%	NaCl
95%	KNO_3

2.4.2 Teplota měření

Cílem bylo prověřit také vliv teploty na sledované vlastnosti zkušebních vzorků kondicionovaných na určitou relativní vlhkost. Zkušební vzorky byly tedy při měření byly současně vystaveny různým teplotám. Konkrétně se jednalo o teplotu okolí, 30 °C, 40 °C a 50 °C.

Teplot vyšších než okolí bylo dosaženo v rámci nastavení parametrů klimatické komory, kde se vzorky exponovaly alespoň hodinu před měřením. Po dobu expozice byla v klimatické udržována také požadovaná vlhkost.

Měřicí systém bylo pro získání co nejpřesnějších hodnot umístěn rovněž v klimatické komoře spolu se vzorky. Tím byl v maximální možné míře eliminován okolní vliv okolního prostředí.

2.4.3 Atmosférické podmínky

Dielektrické vlastnosti připravených zkušebních vzorků byly měřeny v prostředí, kde se měnilo několik parametrů. Měření probíhalo v zimním a jarním ročním období, tudíž za proměnlivých atmosférických podmínek tlaku, teploty a vlhkosti, a to následovně.

Tab. 6 Měření navlhých vzorků při určité vlhkosti a teplotě okolí

Vzorky							
Relativní vlhkost	0	33	55	65	75	95	%
Atmosférické podmínky okolí							
Tlak	998	993	1014	1012	1005	1018	hPa
Teplota	26,1	22,3	18,5	24,2	25,5	26,9	C
Relativní vlhkost	23,5	31,1	30,2	32,9	28,6	36,1	%

2.5 Zkušební zařízení

2.5.1 RLC metr

Vlastnosti zkušebních vzorků byly diagnostikovány přesným RLC metrem HP Agilent E4980A. Tento přístroj umožňuje provádět měření v rozsahu frekvencí 20 Hz až 2 MHz. Měřicí zařízení bylo ovládáno přes rozhraní GPIB a bylo nutné nastavit základní parametry měření. Měření vlastností vzorku bylo v celém frekvenčním rozsahu plně automatizováno. Obslužný software automaticky zapisuje naměřené hodnoty do souboru MS Excel. Všechna měření byla prováděna v režimu měřicího přístroje C_p -D, měřila se tedy kapacita C_p a ztrátový činitel δ .

Přístroj umožňuje nastavení korekcí označených jako OPEN, SHORT, LOAD a délku přívodních vodičů. Tyto korekce slouží k přesnému nastavení počátečního stavu elektrodového systému. Po konzultaci s vedoucím laboratoře bylo od použití korekcí upuštěno. Konektory, ke kterým je připojen elektrodový systém, jsou označeny H_{cur} , H_{pot} , L_{cur} a L_{pot} . [10].

Korekce OPEN slouží k eliminaci parazitní kapacity C_o mezi vodiči měřicího zařízení a elektrodového systému.

Korekce SHORT (nakrátko) slouží k eliminaci parazitní impedance R_s vodičů propojení měřicího zařízení a elektrodového systému.

Korekce LOAD kompenzuje rozdíl naměřené hodnoty a známé standardní hodnoty při přednastavených podmínkách měření.



Obr. 7 RLC metr HP Agilent E4980A

2.5.2 Elektrodotový systém

Při měření byl použit tříelektrodotový systém HP Agilent 16451B, jehož výhodou je využití ochranné elektrodoty, což zajišťuje naměření přesnějších hodnot. Tento elektrodotový systém je připojen na vstupy Hcur, Hpot, Lcur a Lpot RLC metru HP Agilent E4980A. Provozní teplota je v rozmezí 0 až 55 °C. Frekvenční rozsah umožňuje diagnostikovat až do 30 MHz, ale tohoto rozsahu nebylo využito vzhledem k horní mezní frekvenci RLC metru 2 MHz.

Při měření teplotních závislostí bylo nutné elektrodotový systém umístit do klimatické komory a exponovat jej širokému rozsahu stanovených vlhkostí a teplot. Vzhledem k agresivitě prostředí vysoké relativní vlhkosti a teplotě byl pro měření v takovém prostředí využít starší model elektrodotového systému HP Agilent 16451B. Pro měření při teplotě okolí, tj. mimo klimatickou komoru, byl aplikován nový elektrodotový systém stejné řady a stejných parametrů.

Geometrická kapacita C_0 tříelektrodotového systému se stanoví [1]

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S_{ef}}{h} , \quad (28)$$

kde efektivní plocha měřicí elektrodoty je

$$S_{ef} = \pi \frac{(d_m + B.c)^2}{4} . \quad (29)$$



Obr. 8 Elektrodotový systém HP Agilent 16451B

Elektrodotý systém má rozměry $d_m = 38$ mm a $c = 0,2$ mm. Součinitel $B = 1$.

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S_{ef}}{h} = \frac{1,0147 \cdot 10^{-14}}{h}, \quad (30)$$

kde h je tloušťka měřeného vzorku. Geometrická kapacita je tedy závislá pouze na tloušťce vzorku, protože parametry elektrodotého systému se nemění.

2.5.3 Klimatická komora

Klimatizované komory řady CLIMACELL poskytují všechny podmínky pro přesnou a reprodukovatelnou simulaci různorodých klimatických podmínek. Teplotní rozsah je od 0,0 °C do 99,9 °C bez vlhkosti, od 10 °C do 90,0 °C s vlhkostí, přičemž rozsah vlhkosti je 10 % – 90 % RH. Klimatická komora je rovněž vybavena vnitřními skleněnými dveřmi, které umožňují vizuální kontrolu vnitřního prostoru komory bez tepelných ztrát.

Robustní konstrukce a dokonalá ochrana proti korozi jsou zajištěny samonosným vnějším pláštěm z pozinkovaného ocelového plechu s tvrdým a odolným vypalovacím lakem na vnější straně. Vnitřní dvouplášťová komora a panel dveří jsou vyrobeny z kvalitní nerezové oceli. Pro úsporu energie a minimalizaci sálání tepla do okolí je komora dokonale izolována ekologickým izolačním materiálem. Vnitřní stěny komory je možné např. pro čištění snadno vyjmout bez nutnosti použití náradí. Výkonný zvlhčovač je napájen destilovanou vodou (zásobní nádoba je součástí dodávky). Dveře jsou pro dokonalé utěsnění komory zajištěny ve čtyřech bodech. Přístroje jsou vybaveny víceprocesorovou řídicí automatikou se systémem čipových karet [12].



Obr. 9 Klimatická komora Climacell

2.6 Postup měření

Měření předcházelo kondicionování vzorků při nastavení relativní vlhkosti po dobu jednoho až dvou týdnů. Kondicionování probíhalo vzestupně, tedy od nejnižší vlhkosti, v našem případě

0 přes 33, 55, 65, 75 až nakonec 95 %. Pro každou relativní vlhkost prostředí byly snímány a vyhodnocovány frekvenční závislosti složek komplexní permitivity. Hodnoty relativní permitivity a ztrátového čísla byly stanoveny výpočtem ze změřené kapacity a ztrátového čísla byly stanoveny výpočtem ze změřené kapacity a ztrátového činitele vzorku. Při jednotlivých relativních vlhkostech bylo měření opakováno pro teplotu okolí, 30 °C, 40 °C a 50 °C. Teploty byly voleny s ohledem na možnosti elektrodového systému. Po změření všech teplotních závislostí byly vzorky vloženy do exsikátoru s vyšší vlhkostí a následovalo zmíněné kondicionování.

V den měření byl RLC metr HP Agilent E4980A zapnut 30 minut před začátkem měření. V ovládacím programu bylo provedeno nastavení plného frekvenčního rozsahu 20 Hz až 2 MHz, 10 měřených hodnot na dekádu, vypnutí korekcí a měření na každém vzorku bylo opakováno 5krát. Výslednou hodnotou byly průměrné hodnoty všech pěti měření pro každý frekvenční krok.

Stejně tak teplotní závislosti byly proměřeny vzestupně, tedy počínaje teplotou okolí, 30 °C, 40 °C a 50 °C.

2.7 Výsledky měření

Výsledkem měření bylo celkem 34 274 řádků hodnot v programu MS Excel, které byly z jednotlivých souborů následně soustředěny do jediné tabulky a podléhaly dalšímu zpracování. Cílem bylo z naměřených hodnot vytvořit grafické závislosti $\varepsilon' = F(f)$, $\varepsilon'' = F(f)$ a $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$, tj. Coleho-Coleho diagram.

Vzhledem ke značnému množství dat a z toho plynoucí obtížné práce s nimi byla aplikována v programu MS Excel funkce kontingenčních tabulek (pivot table). Dynamickým zpracováním dat byly ze souboru všech hodnot extrahovány a náležitě uspořádány hodnoty potřebné pro sestavení grafických závislostí.

Pro výpočet relativní permitivity ε' platí:

$$\varepsilon' = \frac{C_X}{C_0} \quad (31)$$

kde C_X je kapacita měřeného kondenzátoru s vloženým dielektrikem a C_0 je geometrická kapacita (viz kapitola 2.5.2).

Ztrátové číslo ε'' bylo vypočteno z následujícího vztahu

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \\ \varepsilon'' &= \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \end{aligned} \quad (32)$$

Následující grafické závislosti představujících stěžejní část výsledků měření.

Vliv navlhání na hmotnost zkušebních vzorků byla sledována pravidelným vážením vždy po uplynutí doby nutné pro kondicionování vzorků. Navlhání probíhalo vzestupně přes 5 vlhkostí až té nejvyšší. Bylo tak možné porovnat nárůst hmotnosti jednotlivých vzorků vůči předchozímu stavu (viz vztah 33), kde n představuje aktuální hmotnost kondicionovaného vzorku a $n-1$ hmotnost vzorku po kondicionování v předcházející nižší vlhkosti. Vzhledem k číselnému pohybu v řádu tisícín byly hodnoty převedeny na miligramy. Dle očekávání hmotnost vzorků narůstala. Z porovnání vyplývá, že se nárůst hmotnosti pohyboval v rozmezí 13,5 až 14,5 mg.

$$\begin{aligned} \Delta m &= \frac{m_n - m_{n-1}}{m_{n-1}} \cdot 1000 \\ &\Rightarrow \frac{m_{RH=95\%} - m_{RH=75\%}}{m_{RH=75\%}} \cdot 1000 \end{aligned} \quad (33)$$

Vliv navlhání na hmotnost vzorků je vidět v tab. 7.

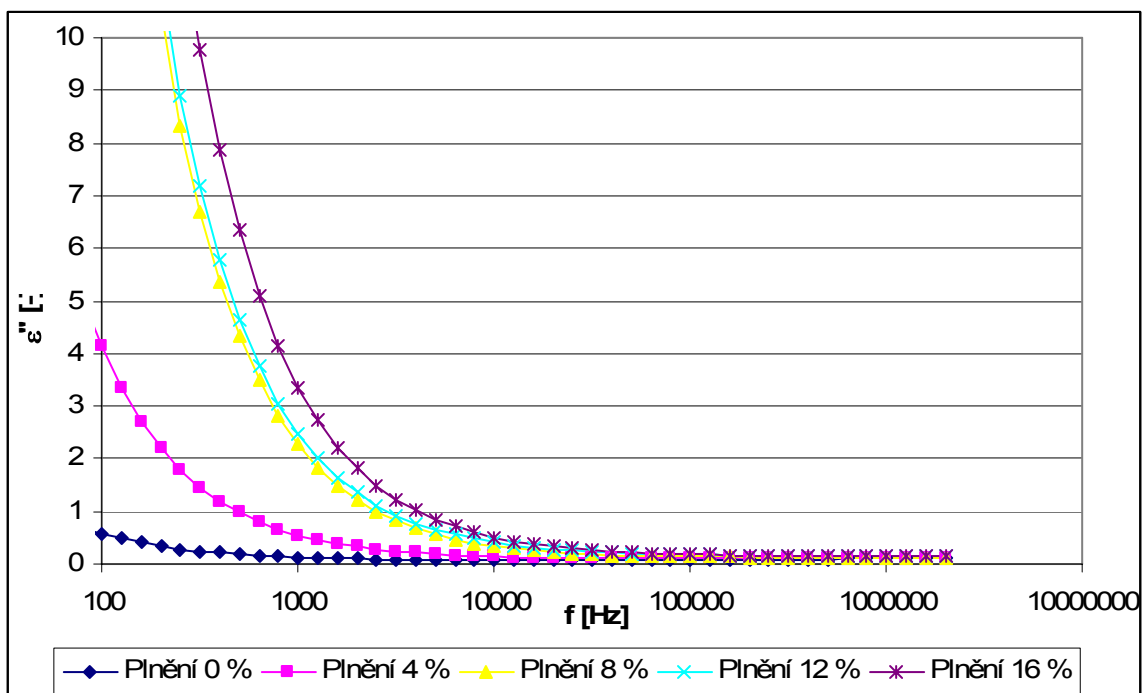
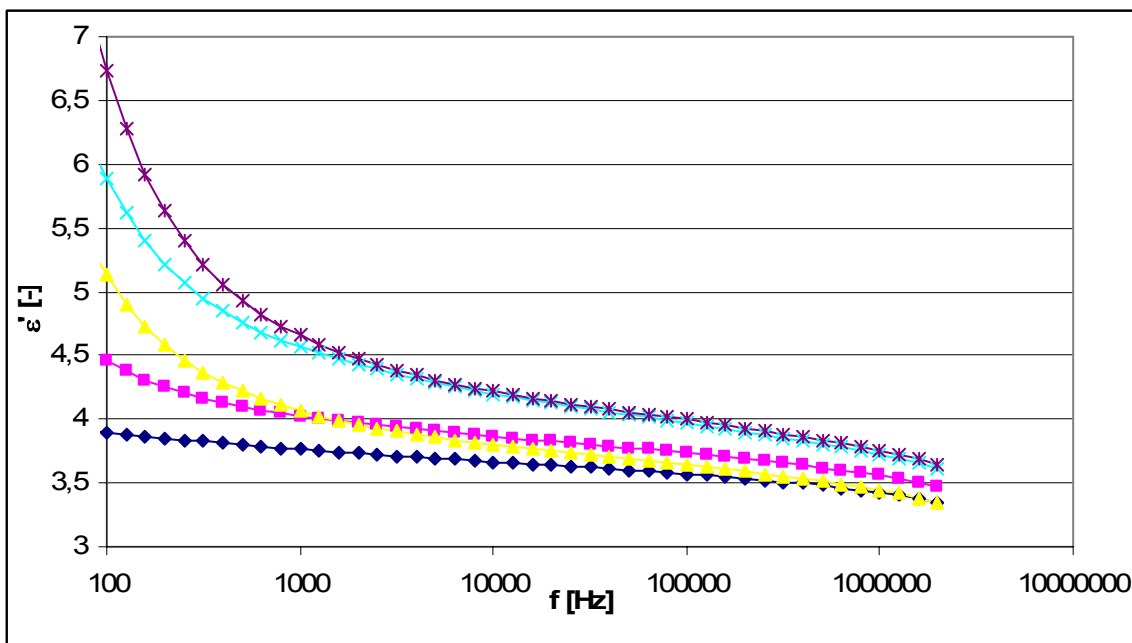
Následující grafy závislosti $\varepsilon' = F(f)$, $\varepsilon'' = F(f)$ a $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$. Z popisu měření uvedeného vyplývá, že budou výsledky vyhodnoceny z hlediska třech parametrů – plnění, vlhkost a teplota – a jejich kombinací. Pro větší přehlednost jsou grafické závislosti uspořádány na každé straně následujícím způsobem.

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= F(f) \\ \varepsilon'' &= F(f) \\ \varepsilon'' &= F(\varepsilon') \end{aligned}$$

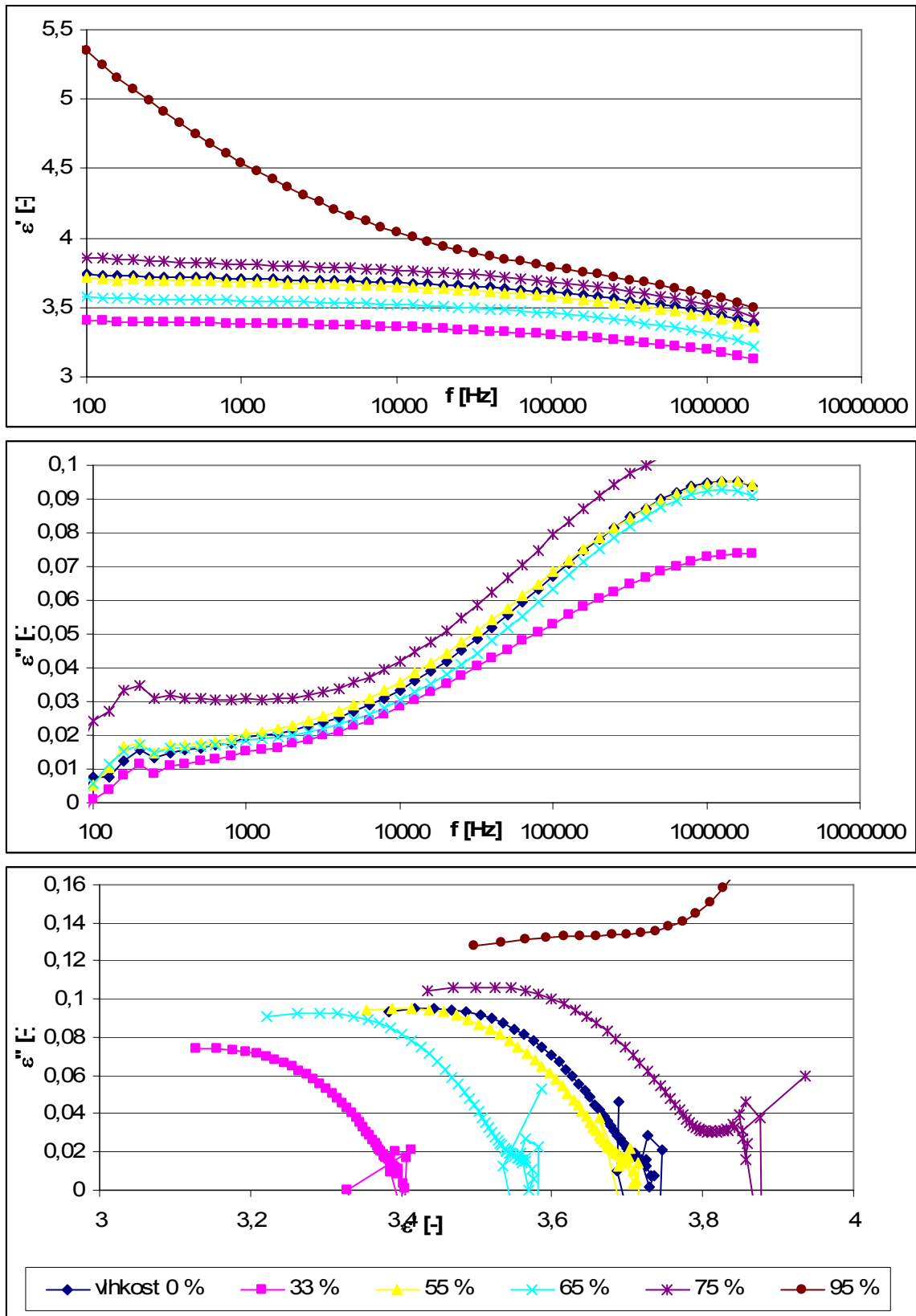
Vzhledem k tomu, že řady jsou v každém ze tří grafů ve stejném pořadí, je uvedena pouze jedna legenda pod grafy. Legenda je pro všechny tři závislosti společná.

Tab. 7 Nárůst hmotnosti vzorků vlivem navlhání

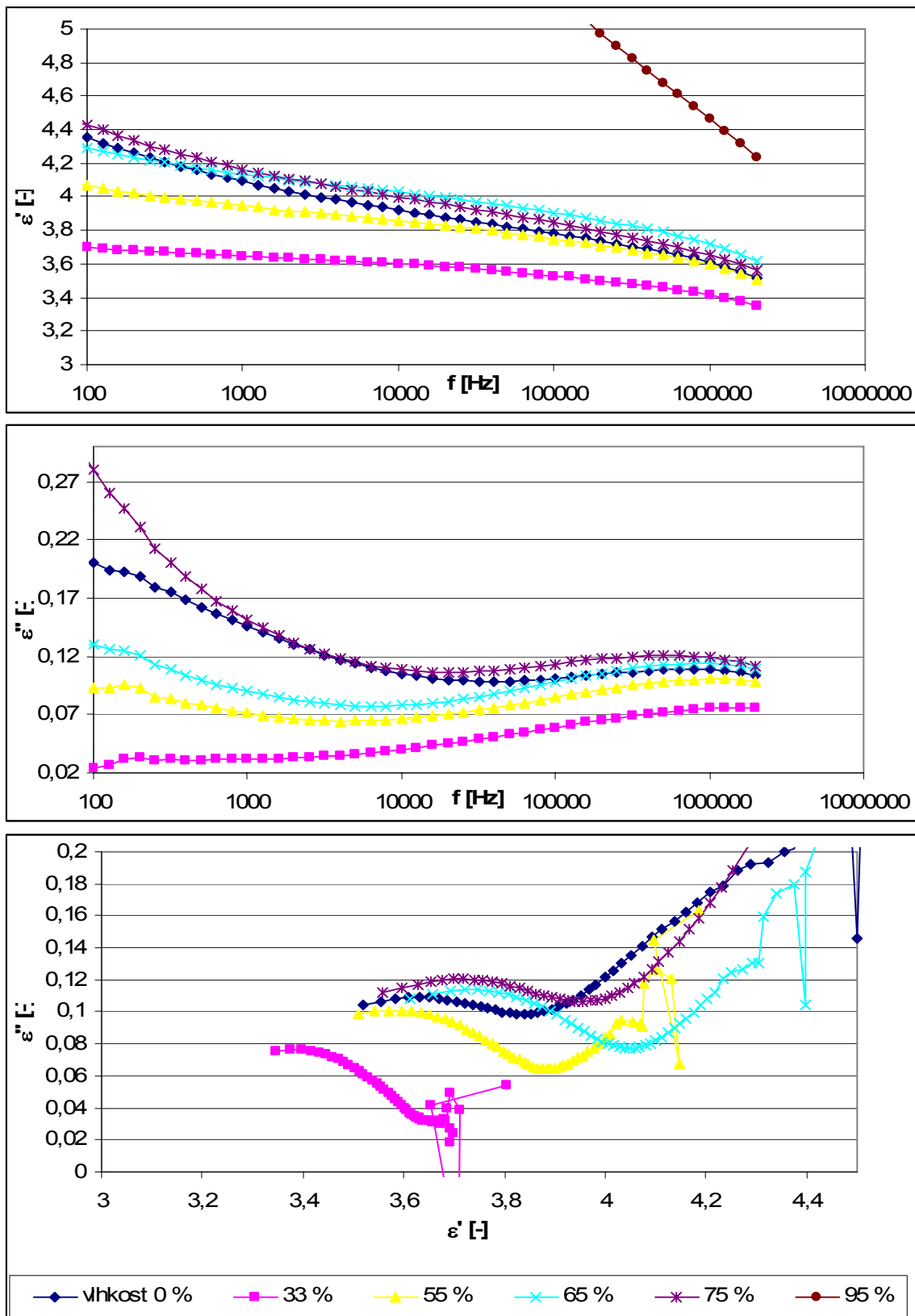
		změna hmotnosti Δ mg					
plnění	vzorek	33 %	55 %	65 %	75 %	95 %	95 % vs. 0 %
[%]	[-]	[mg]					
0	1	3,2	2,8	1,6	2,1	4,1	13,9
	2	2,7	2,2	1,1	2,1	4,5	12,6
	3	3,4	2,4	1,2	2,2	4,5	13,9
	4	3,1	1,8	0,9	2,6	4,8	13,2
	5	3,8	2,0	1,3	2,6	4,1	13,9
	∅	3,2	2,2	1,2	2,3	4,4	13,5
4	1	4,1	2,0	1,4	2,4	4,3	14,3
	2	3,9	1,5	1,6	2,4	4,3	13,8
	3	3,2	2,9	1,1	3,0	4,5	14,7
	4	3,2	3,2	0,9	2,4	4,8	14,7
	5	3,0	4,0	0,7	2,5	5,2	15,4
	6	2,6	3,3	0,9	2,6	4,5	14,0
	∅	3,3	2,8	1,1	2,5	4,6	14,5
8	1	2,0	2,8	0,9	2,5	5,1	13,4
	2	2,9	3,1	1,0	3,3	4,0	14,3
	3	2,3	2,9	1,0	2,5	5,4	14,2
	4	2,0	2,5	1,0	2,4	5,5	13,5
	5	2,2	2,9	0,8	2,9	5,1	13,9
	6	2,6	3,1	1,0	2,6	4,9	14,3
	∅	2,3	2,9	1,0	2,7	5,0	13,9
12	1	3,0	3,3	1,0	2,6	5,3	15,3
	2	2,0	3,1	1,1	2,5	5,6	14,5
	3	1,8	2,2	1,0	2,4	5,4	12,9
	4	1,8	2,9	1,2	2,5	5,5	14,0
	5	2,0	2,7	1,1	2,2	5,8	13,8
	6	2,1	2,5	1,2	2,3	6,0	14,2
	∅	2,1	2,8	1,1	2,4	5,6	14,1
16	1	4,0	2,3	0,9	2,5	5,7	15,5
	2	2,1	1,8	0,8	2,1	5,2	12,2
	3	3,1	1,9	1,0	2,5	5,7	14,3
	4	2,0	2,2	0,8	2,3	5,4	12,8
	5	2,4	2,5	1,0	2,4	5,5	14,0
	∅	2,7	2,2	0,9	2,4	5,5	13,8



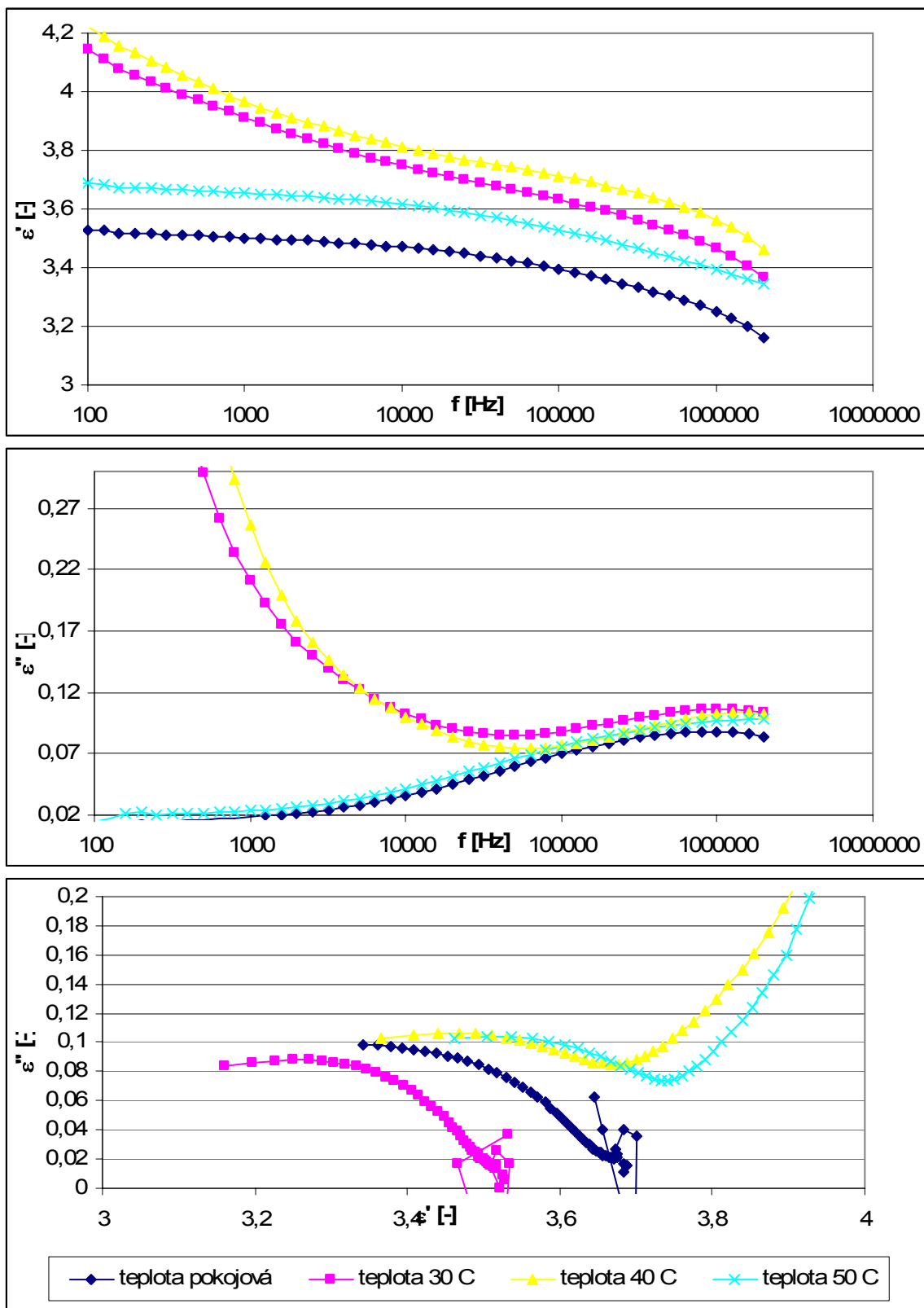
Obr. 10 Vliv hmotnostního plnění na dielektrické vlastnosti



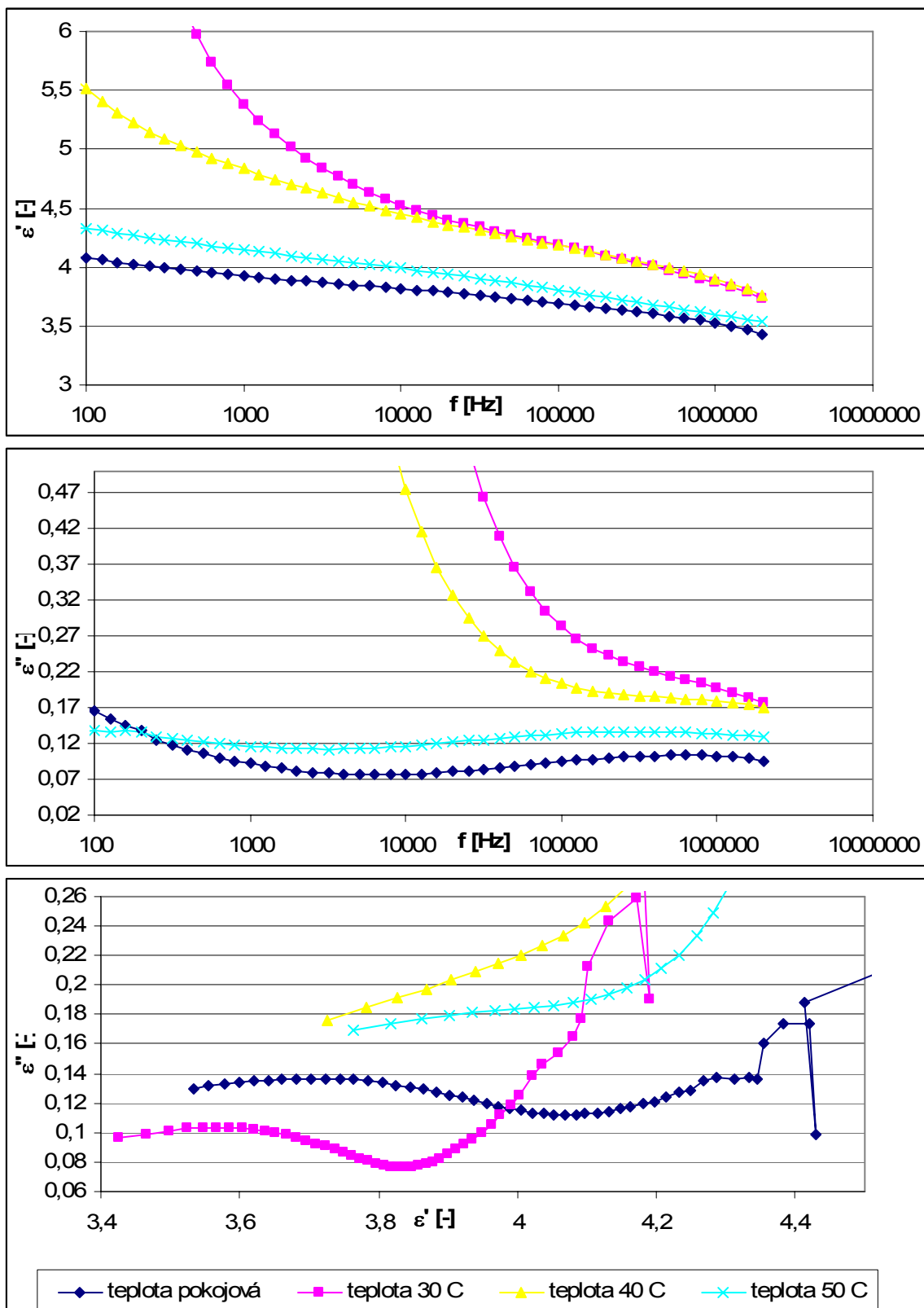
Obr. 11 Vliv 0 % plnění a vlhkosti na dielektrické vlastnosti



Obr. 12 Vliv 16 % plnění a vlhkosti na dielektrické vlastnosti



Obr. 13 Vliv 0 % plnění a teploty na dielektrické vlastnosti



Obr. 14 Vliv 16 % plnění a teploty na dielektrické vlastnosti

2.8 Vyhodnocení experimentu

Z vytvořených grafických závislostí $\varepsilon' = F(f)$, $\varepsilon'' = F(f)$ a $\varepsilon'' = f(\varepsilon')$ z naměřených hodnot je patrné, že chování dielektrika se mění v závislosti na klimatických podmínkách. Vliv navlhání a teploty silně ovlivňuje vlastnosti dielektrik. Průběhy si zachovávají přibližně stejný tvar, ale mění se hodnoty při daných frekvencích. V závislostech $\varepsilon'' = F(f)$ je možné pozorovat jedno až dvě relaxační maxima. Největší vliv na hodnoty ε' a ε'' se projevil při nižších frekvencích do 10 kHz.

Obr. 10 znázorňuje vliv hmotnostního plnění na dielektrické vlastnosti vzorků. Ze závislostí vyplývá, že větší podíl slídy přispívá ke zvýšené relativní permitivitě i k vyššímu ztrátovému číslu. Z hlediska vlivu plnění na dielektrické vlastnosti zkušebních vzorků lze tedy vidět, že plnění má velký vliv na nárůst relativní permitivity a ztrátového čísla, což je znatelné i bez působení vnějších vlivů teploty a vlhkosti.

Obr. 11 a 12 zobrazují diagnostiku dielektrických vlastností v závislosti na vlhkosti a plnění. Výsledkem je porovnáním dvou extrémů plnění 0 % a 16 % v celém rozsahu vlhkosti. Významná změna dielektrických vlastností vlivem teploty plyne ze především závislosti $\varepsilon'' = F(f)$, kdy u vzorků s vyšším plněním výrazně vzrostlo ztrátové číslo.

Obr. 13 a 14 znázorňuje významný vliv teploty na dielektrické vlastnosti zkušebních vzorků. Vliv teploty je názorně vidět při porovnání $\varepsilon' = F(f)$.

Změna vlhkosti a teploty měla největší vliv na vzorky s nejvyšším 16 % plněním slídy. Největší kontrast ve změně dielektrických vlastností je vidět při porovnání dvou extrémů, tj. vzorků s plněním 0 % při pokojové teplotě proti vzorkům s plněním 16 % a teplotě 50 °C. Vzorky byly také vyhodnoceny při nulové vlhkosti oproti vzorkům s plněním 16 % při teplotě 50 %.

Zvyšující se hmotnost s rostoucí vlhkostí lze fyzikálně přisoudit vlivu navlhavosti tohoto kompozitu.

Průběhy odpovídají teoretickým předpokladům i když je třeba říci, že v některých závislostech se projevila chyba, která byla patrně způsobena makroskopickou nehomogenitou vzorků, přičemž velký vliv na správnost hodnot má uložení vzorku do elektrodového systému.

Příčina další chyby je pravděpodobně zakotvena v technologii přípravy zkušebních vzorků. Metoda byla zvolena vhodně, ale geometrické rozměry teflonových forem nebyly totožné, což mělo za následek proměnlivou tloušťku vzorku. Tento faktor ovlivňuje výpočet relativní permitivity, a proto byl zahrnut do výpočtu geometrické kapacity.

Odlišný objem pak mohl sehrát úlohu při vytváření vzduchových bublin i při prvotní vizuální kontrole před vytvrzením vzorků.

3 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala vlivem klimatických podmínek na dielektrické vlastnosti dvousložkového kompozitního materiálu. Bylo vytvořeno několik sad zkušebních vzorků s různým podílem plniva. Základním materiálem byl impregnační lak TSA 220S na bázi epoxidové pryskyřice a do kterého byla přimíšena mletá slída 60.030.

Vzorky byly diagnostikovány metodou dielektrické relaxační spektroskopie (DRS). Nedestruktivní metoda DRS pro diagnostiku dielektrických materiálů byla realizována měřicím systémem složeným z RLC metru HP Agilent E4980A, elektrodového systému HP Agilent 16451B a klimatické komory Climacell.

Zkušební vzorky byly vystaveny změnám klimatických podmínek. Byl zkoumán vliv hmotnostního plnění slídy (0, 4, 8 a 16 % slídy), vlhkosti (0, 33, 55, 65, 75 a 95 %) a teploty (pokojová, 30, 40 a 50 °C) na frekvenční závislosti složek komplexní permitivity.

Sériemi experimentů byly ověřeny teoretické předpoklady o závislosti dielektrických vlastností na vlhkosti a teplotě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROZSÍVALOVÁ, Z. a kol. *Materiály a technická dokumentace – Laboratorní cvičení: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2004.
- [2] JIRÁK, J., ROZSÍVALOVÁ, Z. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy – Laboratorní cvičení: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2003.
- [3] JIRÁK, J. a kol. *Materiály a technická dokumentace - část Materiály v elektrotechnice*: Brno, VUT FEKT v Brně, 2002
- [4] KAZELLE, J. a kol. *Výrobní procesy: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2006.
- [5] LIEDERMANN, K., jun. *Dielektrická relaxační spektroskopie polymerních látek: Habilitační práce*. Brno, VUT FEKT v Brně, 1996.
- [6] LIEDERMANN, K., *Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2008.
- [7] ROZSÍVALOVÁ, Z., LIEDERMANN, K. a kol. *Klimatotechnologie: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2006.
- [8] EpoxyLite TSA 220S: *Materiálový list*. Praha, 2005.
- [9] HP E4980A Precision LCR Meter - *Operation Manual*. Yokogawa - Hewlett - Packard LTD 1989.
- [10] HP 16451B Dielectric Test Fixture - *Operation and Service Manual*. Yokogawa Hewlett - Packard LTD 1989.
- [11] Mletá slída 60.030: Materiálový list.
- [12] *Climacell* [online] [cit. 2009-5-21].
<<http://www.bmt.cz/article.asp?nDepartmentID=112&nArticleID=95&nLanguageID=1#add2>>