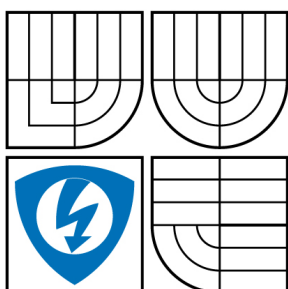




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

STUDIUM ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

STUDY OF ELECTRIC PROPERTIES OF COMPOSITE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV MACHÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. HELENA POLSTEROVÁ, CSc.

BRNO 2009

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Miroslav Macháček

Bytem: Hošťálková 394, 756 22

Narozen/a (datum a místo): 5.12.1983, 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:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 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: Studium elektrických vlastností kompozitních materiálů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Helena Polsterová, CSc.

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:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá problematikou kompozitních materiálů. Základním zaměřením této práce je sledování vlivu plnění mletou slídou na dielektrická spektra. Pro tyto účely byly vytvořeny vzorky plněné slídou s různým hmotnostním procentem. Změřené hodnoty byly porovnány s teoretickými hodnotami vypočtenými pomocí směsných vztahů.

Abstract:

This work deals with issues of composite materials. The general aim is to observe how the amount of filling influence dielectric spectrum which is measured on prepared samples. For this purpose had been created variety of a samples with different percentage of filling with mica. Measured values had been compared with theoretically values, determined using mixture formulas.

Klíčová slova:

Kompozitní materiály, slída, dielektrické spektrum, relativní permitivita, ztrátový činitel, izolant.

Keywords:

Composite material, mica, dielectric spectrum, specific electric inductive capacity, power loss factor, insulating material.

Bibliografická citace díla:

MACHÁČEK, M. *Studium elektrických vlastností kompozitních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Helena Polsterová, CSc.

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

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Heleně Polsterové, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor:	Bc. Miroslav Macháček
Název závěrečné práce:	Studium elektrických vlastností kompozitních materiálů
Název závěrečné práce ENG:	Study of electric properties of composite
Anotace závěrečné práce:	Předkládaná práce se zabývá problematikou kompozitních materiálů. Základním zaměřením této práce je sledování vlivu plnění mletou slídou na dielektrická spektra.
Anotace závěrečné práce ENG:	This work deals with issues of composite materials. The general aim is to observe how the amount of filling influence dielectric spectrum which is measured on prepared samples
Klíčová slova:	Kompozitní materiály, slída, dielektrické spektrum, relativní permitivita, ztrátový činitel, izolant.
Klíčová slova ENG:	Composite material, dielectric spectrum, specific electric inductive capacity, power loss factor, insulating material.
Typ závěrečné práce:	diplomová
Datový formát elektronické verze:	formát pdf
Jazyk závěrečné práce:	český
Přidělovaný titul:	Ing.
Vedoucí závěrečné práce:	Ing. Helena Polsterová, CSc.
Škola:	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta:	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav:	Ústav elektrotechnologie
Studijní program:	Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor:	Elektrotechnická výroba a management

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Teoretická část.....	8
2.1	Elektrická vodivost izolantů	8
2.1.1	<i>Elektrická vodivost tuhých izolantů.....</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů.....</i>	<i>8</i>
2.2	Polarizace dielektrik.....	9
2.2.1	<i>Druhy elektrické polarizace.....</i>	<i>9</i>
2.2.2	<i>Klasifikace izolantů podle druhů polarizace</i>	<i>13</i>
2.3	Permitivita izolantů.....	13
2.3.1	<i>Permitivita tuhých izolantů</i>	<i>15</i>
2.4	Dielektrické ztráty.....	17
2.4.1	<i>Základní pojmy</i>	<i>17</i>
2.4.2	<i>Dielektrické ztráty v tuhých izolantech</i>	<i>18</i>
2.5	Elektrická pevnost izolantů.....	23
2.5.1	<i>Elektrická pevnost tuhých izolantů.....</i>	<i>23</i>
2.6	Anorganické izolanty	24
2.6.1	<i>Slída</i>	<i>24</i>
2.6.2	<i>Slída pro elektrotechniku.....</i>	<i>25</i>
2.7	Epoxidová pryskyřice	27
2.7.1	<i>Epoxidové laky.....</i>	<i>28</i>
2.7.2	<i>Licí epoxidové pryskyřice.....</i>	<i>28</i>
3	Experimentální část.....	30
3.1	Příprava experimentálních vzorků.....	30
3.2	Podmínky měření.....	30
3.3	Měřicí zařízení.....	30
3.4	Postup měření.....	31
3.5	Naměřené hodnoty	32
3.5.1	<i>Vliv teploty na dielektrické vlastnosti materiálů.....</i>	<i>32</i>
3.5.2	<i>Vliv plnění na dielektrické vlastnosti materiálů</i>	<i>33</i>
3.6	Naměřené a vypočtené hodnoty.....	40
3.6.1	<i>Naměřené hodnoty vzorku s plněním 20 %</i>	<i>40</i>
3.6.2	<i>Vzorový výpočet objemových hodnot vzorku s plněním 20 %.....</i>	<i>40</i>
3.6.3	<i>Směsné vztahy</i>	<i>41</i>
4	Závěr	43
5	Použitá literatura	45

1 Úvod

Elektroizolační materiály tvoří dnes velmi rozsáhlou skupinu látek. Patří k nim izolanty klasické, jako např. vzduch, organické vláknité látky, přírodní kaučuk, minerální oleje, asfalty, slída, apod., velká řada organických makromolekulárních látek syntetických a velké množství druhů izolantů anorganických. V dnešní době zaujímají přední místo izolanty syntetické. Tyto izolanty přinesly rozhodný obrat ve výrobě elektrických zařízení, protože umožnily zavedení nových, vysoce produktivních technologií a uplatňují se také v oblasti automatizace.

Využívání těchto nových materiálů a technologií je podmínkou dalšího rozvoje všech oborů elektrotechniky. Nemalý význam mají i izolanty anorganické. Bez nich by nebylo možné vyrábět mnoho špičkových zařízení energetických, elektronických aj. a realizovat dnešní technický pokrok.

2 Teoretická část

2.1 Elektrická vodivost izolantů

2.1.1 Elektrická vodivost tuhých izolantů

Elektrickou vodivost tuhých izolantů způsobuje jednak pohyb iontů vlastního izolantu, jednak ionty náhodných příměsí a v některých materiálech může být způsobována i přítomností volných elektronů. V běžných podmínkách se v převážné míře vyskytuje iontová vodivost.

Druh elektrické vodivosti se experimentálně zjišťuje využitím Faradayova zákona. Iontová vodivost se projevuje při přenosu látky na elektrody. Při elektronové vodivosti se tento jev nevyskytuje.

Při průchodu elektrického proudu tuhým izolantem se ionty příměsí, které tento izolant obsahuje, mohou částečně odstranit tím, že se vyloučí na elektrodách. To zmenší elektrickou vodivost a hodnotu protékajícího proudu dlouhotrvajícím působením stejnosměrného proudu. [1]

Otázka, jestli vodivost v izolantu je iontová nebo elektronová, se v každém konkrétním případě řeší podle údajů o energii aktivace nosičů náboje. Je známo, že např. v chloridu sodném energie aktivace iontů sodíku při normální teplotě je asi 0,85 eV. Energie aktivace iontů chlóru je třikrát větší a energie aktivace elektronů (šířka zakázaného pásma) 6 eV. Střední hodnota energie tepelného pobytu je současně jen 0,025 eV.

2.1.2 Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů

Povrchovou elektrickou vodivost tuhých izolantů výrazně ovlivňuje voda adsorbovaná na jejich povrchu a případné nečistoty. Adsorpce vodních par je velmi rozdílná na různých materiálech, záleží na tom, zda se jedná o materiál hydrofilní nebo hydrofóbní. Jestliže se materiál skládá z nepolárních molekul tj. z molekul s kovalentními vazbami a bez dipólového momentu, jako např. parafín, pak přitažlivá síla mezi molekulou vody a molekulou pevného izolantu je menší než mezi samostatnými molekulami vody navzájem, přičemž voda se neadsorbuje na povrchu těchto izolantů. Jestliže i ve vzduchu nad povrchem tohoto izolantu překročí množství vodní páry stav nasycení a voda kondenzuje, nevytvoří na izolantu vrstvu, ale usadí se ve formě drobných kapiček (hydrofobní materiál). Polární izolanty představují přechodnou oblast mezi

oběma krajními případy. Čím větší je stupeň polarity látky, tím výraznější je adsorpce vody na jejím povrchu. [1]

2.2 Polarizace dielektrik

Pohyb vázaných elektrických nábojů v izolantech pod účinkem elektrického pole vysunuje tyto náboje z jejich rovnovážných poloh na ohraničenou malou vzdálenost a nazývá se **polarizace dielektrik**.

Míru polarizace dielektrika hodnotíme podle zvýšení kapacity kondenzátoru, jestliže mezi desky vakuového kondenzátoru vložíme dané dielektrikum. Poměr kapacity kondenzátoru s daným dielektrikem C_d ke kapacitě kondenzátoru s vakuem mezi deskami (stejných rozměrů) C_0 nazýváme relativní permitivita ϵ_r .

$$\epsilon_r = C_d / C_0 . \quad (2.1)$$

Velikost kapacity kondenzátoru s dielektrikem a na něm nahromaděný elektrický náboj, jsou podmíněné souhrnem různých druhů polarizací. Jednotlivé druhy polarizací se vyskytují v různých dielektrických materiálech (izolantech), přičemž v jednom materiálu se může současně vyskytnout několik druhů polarizací. Náhradním schématem dielektrika, ve kterém se vyskytují různé polarizace, je řada kondenzátorů paralelně zapojených a připojených ke zdroji napětí. Kapacita C_0 a náboj Q_0 odpovídají případu, kdy je mezi elektrodami kondenzátoru vakuum.

2.2.1 Druhy elektrické polarizace

Při popisu polarizací je možno narazit na odlišnou terminologii různých autorů. Proto uvedeme systém klasifikace polarizací, který zahrne všechny polarizace do přehledu (tab. 2.1.1).

Skupina polarizací	Polarizace
I. Deformační (pružné, rychlé)	1. elektronová 2. iontová
II. Relaxační (tepelné, orientační)	3. dipólová 4. iontová relaxační
III. Migrační (mezivrstevná, vysokonapěťová, objemová)	
IV. Spontánní (samovolná)	

Tab. 2.1.1. Klasifikace polarizací

Skupina deformačních (pružných, rychlých) polarizací se vyznačuje tím, že vázané elektrické náboje (elektrony, ionty) jsou na místech svých rovnovážných poloh vázané pružnými elektrostatickými silami. Proto jejich vychýlení působením vnějšího elektrického pole, jako i návrat do původní polohy po zániku pole v materiálu se odehrává velmi rychle v porovnání s ostatními druhy polarizací prakticky okamžitě, což dokazuje skutečnost, že tyto polarizace nejsou spojené s dielektrickými ztrátami.

Elektronová polarizace je pružné vychýlení elektronů elektronového obalu atomu, molekul a iontů z jejich normální polohy na takovou vzdálenost, kde budou v rovnováze dvě stejně velké a proti sobě působící síly; síla od vnějšího elektrického pole a síla, kterou je částice přitahována do své rovnovážné polohy. Každá částice (atom, molekula, iont) polarizovaná elektronově, získává indukovaný elektrický dipólový moment. Převážná část celkového indukovaného dipólového momentu vzniká v důsledku pohybu elektronů posledního, vnějšího elektronového obalu, které jsou nejméně vázané.

Iontová polarizace je pohyb pružně vázaných iontů a vyskytuje se v iontových krystalech a ve všech případech, kdy chemická vazba v izolantu je iontová, a nebo alespoň částečně iontová. Při takové definici iontové polarizace do ní zahrnujeme i atomovou polarizaci, která se někdy v literatuře považuje za samostatný druh polarizace a vyskytuje se v látkách s kovalentní vazbou, přičemž má vazba částečně iontový charakter. Fyzikální podstata atomové polarizace je stejná jako při iontové polarizaci. Doba ustálení iontové polarizace je asi 10^{-3} s, a proto tato polarizace není spojená s dielektrickými ztrátami v celém rozsahu technicky používaných frekvencí.

Skupina relaxačních polarizací se vyznačuje podstatně delší dobou ustálení polarizace. Po připojení napětí dipólové molekuly nebo ionty v iontové amorfní látce se

postupně přeskupí tak, že přechod z původního stavu, ve kterém izolant není polarizován, do konečného stavu, ve kterém je izolant polarizovaný, probíhá exponenciálně. K výslednému polarizačnímu stavu se soustava vázaných nábojů přibližuje asymptoticky. Časová konstanta tohoto děje (relaxační doba) je důležitou charakteristikou polarizace. Po odpojení napětí příčinou zániku polarizovaného stavu izolantu je tepelný pohyb, který postupně, podle exponenciální závislosti přivede soustavu vázaných nábojů do původního nepolarizovaného stavu. Název orientační polarizace souvisí zvláště s dipólovou polarizací, ve které jde o orientaci dipólových molekul elektrickým polem. Pro shodné vnější znaky s iontovou relaxační polarizací se tento název používá společně pro obě polarizace.

Dipólová polarizace (dipólová relaxační polarizace) se liší od elektronové a iontové tím, že je spojena s tepelným pohybem částic (molekul). Dipólové molekuly, které se nacházejí v chaotickém, tepelném pohybu, se částečně orientují pod účinkem elektrického pole, což se jeví navenek jako polarizace izolantu. Dipólová polarizace se vyskytuje v polárních plynech a kapalinách. Vyskytuje se i v tuhých polárních organických látkách, ale v tomto případě se při polarizaci nepohybuje celá molekula jako jeden celek, ale jen dipólové radikály (skupiny atomů vázané na základní molekulový řetězec jednou chemickou vazbou) vzhledem k molekule. Tato polarizace se nazývá také dipólovou radikálovou polarizací.

Iontová relaxační polarizace se vyskytuje v organických amorfních látkách (organických sklech) a v některých iontových krystalických anorganických látkách, zvláště při větší koncentraci poruch krystalové mřížky. Teplotní závislost relativní permitivity v látkách s iontovou relaxační polarizací by měla být podle teoretických představ analogická, jako v látkách s dipólovou polarizací. Vysvětluje se to tím, že v mnohých typech radiokeramiky množství iontů zúčastňujících se relaxační polarizace s teplotou neustále vrůstá.

Migrační polarizace se vyskytuje v nehomogenních dielektrikách, které se skládají ze dvou nebo více materiálů s rozdílnou vodivostí a také rozdílnou permitivitou. Když je tento materiál v elektrickém poli, pak se na rozhraní dvou prostředí s různou pohyblivostí volných nábojů tyto náboje hromadí a tím se stávají nepohyblivými – vázanými. Ve vnějším obvodu se tento děj jeví jako polarizace. Migrační polarizace se v literatuře vyskytuje pod více názvy jako mezivrstevná, vysokonapěťová, objemová, polarizace prostorovým nábojem, atd. Některé z těchto názvů označují proces migrační polarizace za určitých specifických okolností (mezivrstevná, vysokonapěťová), ostatní jsou jen jiným označením pro stejný všeobecně chápáný proces migrační polarizace.

Mezivrstvová polarizace se vyskytuje ve vrstvených materiálech jako jsou: impregnovaný papír, tvrzený papír, vrstvová vysokonapěťová izolace elektrických točivých strojů, atd. Je to krajní výrazný druh migrační polarizace, při kterém se charakteristické znaky migrační polarizace projevují velmi výrazně.

Vysokonapěťová polarizace je speciální druh migrační polarizace, která je charakteristická tím, že izolační materiál ve kterém se vyskytuje, je homogenní a nehomogenním se stává až účinkem elektrického pole. Je podmíněna unipolární vodivostí, tj. pohyblivé jsou nosiče nábojů jen jednoho znaménka. Výrazně se projevuje při vysokém stejnosměrném napětí. Vyskytuje se i při nízkých frekvencích střídavého napětí. Prakticky nejdůležitějším případem jejího výskytu je skupina anorganických skel, kde jsou pohyblivými nosiči náboje jen kladné ionty. Účinkem vysokého stejnosměrného napětí se kladné ionty pohybují směrem k záporné elektrodě a u kladné elektrody vzniká tenká vrstva ochuzená o volné náboje, tedy vrstva s mírně vyšším elektrickým odporem než je zbytek materiálu. Z původního homogenního materiálu se stává materiál nehomogenní a současně polarizovaný vysokonapěťovou polarizací.

Spontánní (samovolná) polarizace je nelineárně závislá na intenzitě elektrického pole a jejím charakteristickým znakem je výrazné maximum v závislosti permitivity na teplotě. Spontánní polarizace je spojená s velkými dielektrickými ztrátami. V materiálech se spontánní polarizací jsou jednotlivé oblasti (domény), ve kterých elektricky nabitě částice jsou rozloženy nesymetricky i bez přítomnosti elektrického pole. Směr orientace elektrických momentů v různých doménách je různý, takže materiál jako celek se jeví jako nepolarizovaný. Působení vnějšího elektrického pole zapříčiňuje orientaci elektrických momentů domén ve směru pole, což se jeví navenek jako velmi silná polarizace.

Rezonanční polarizace se vyskytuje v izolantech při frekvencích viditelného světla, tedy mimo rozsah frekvencí používaných v elektrotechnice. Avšak za určitých okolností, vyskytují-li se v materiálu tzv. defektní elektrony, se její výskyt přesouvá k nižším frekvencím, tj. do oblasti nejvyšších technicky používaných frekvencí. Rezonanční polarizace závisí na fyzikálně chemických zvláštностech materiálů, souvisejících s vlastní frekvencí kmitání elektronů nebo iontů (při velmi vysokých frekvencích), nebo s charakteristickou frekvencí defektních elektronů (při nižších frekvencích). Rezonanční elektronová polarizace je spojena s anomální disperzí světla a je doposud neprozkoumaná. Při anomální disperzi indexu lomu materiálu při určité frekvenci vzrůstá rezonancí frekvence vnějšího elektrického pole a frekvencí vlastních kmitů částic. Při

rezonanci velmi vzrůstá pohlcování energie což se projeví ve vzrůstu dielektrických ztrát. [1]

2.2.2 Klasifikace izolanů podle druhů polarizace

Podle toho, jaké polarizace se v izolantech vyskytují, dělí se izolanty do následujících skupin, shodných s jejich klasifikací podle druhu dielektrických ztrát (viz kapitola 2.4.2. Dielektrické ztráty v tuhých izolantech).

- Napolární izolanty
- Polární izolanty
- Iontové krystaly
- Iontové amorfnní látky
- Feroelektrika

2.3 Permitivita izolanů

Permitivita je jednou ze stavových veličin dielektrik a úzce souvisí s polarizací. Relativní permitivita je číslo, které udává, kolikrát se zvětšila kapacita mezi deskami kondenzátoru, když bylo původní vakuum nahrazeno jiným materiálem. U konkrétních materiálů má charakteristickou hodnotu, která je větší než 1. Její závislost na teplotě je způsobena vlastnostmi materiálu a může být nepatrná, např. u neutrálních tuhých izolanů, nebo velmi výrazná, např. u fotoelektrik [1].

Vzhledem k tomu, že, jak je všeobecně známo, se dielektrikum namáhané střídavým polem chová zcela jinak, než při působení stejnosměrného pole, bude jiný i matematický popis dějů probíhajících v dielektriku. Je pochopitelné, že tento popis je značně náročnější, neboť v tomto případě musíme brát v úvahu kinetické vlastnosti částic. Setrvačnost těchto částic je právě příčinou fázového zpoždění vektoru elektrické indukce $D(t)$ za vektorem intenzity elektrického pole $E(t)$ o určitý úhel δ (předpokládáme samozřejmě sinusový průběh napětí). Pro vyjádření vztahu vektoru elektrické indukce $D(t)$ a vektoru středního makroskopického pole $E(t)$ využíváme symbolicko-komplexní metodu. [7]

Nejprve tedy provedeme následující přiřazení:

$$D(t) \rightarrow D_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (2.2)$$

$$E(t) \rightarrow E_m \cdot e^{j\omega t} \quad (2.3)$$

kde D_m a E_m jsou amplitudy příslušných vektorů.

Na základě tohoto přiřazení můžeme vztah mezi vektorem elektrické indukce $D(t)$ a vektorem středního makroskopického pole $E(t)$ napsat takto

$$D_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot E_m \cdot e^{j\omega t} \quad (2.4)$$

Upravíme levou stranu, vykrátíme členy obsahující čas a postupně dostaneme:

$$D_m \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot E_m \cdot e^{j\omega t} \quad (2.5)$$

$$D_m \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot E_m \quad (2.6)$$

V případě střídavých polí se zavádí frekvenčně závislá komplexní permitivita ε^* .

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.7)$$

kde ε' je reálná část komplexní permitivity a ε'' je imaginární část komplexní permitivity.

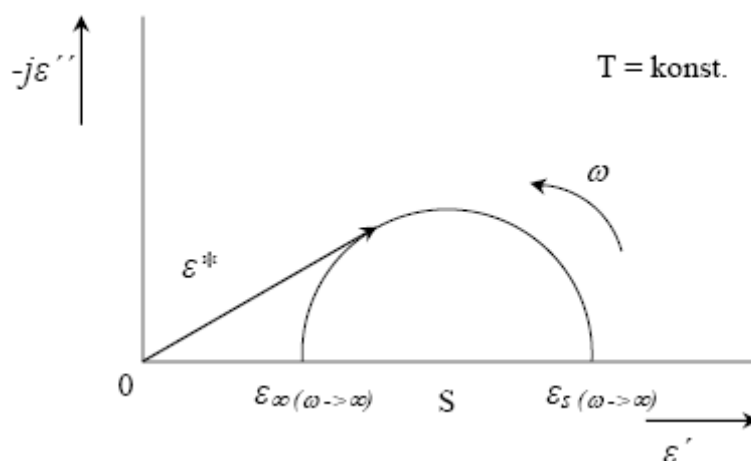
Grafickým znázorněním tohoto vztahu je Cole-Coleho kruhový diagram, jehož kružnice je geometrickým místem hodnot komplexní permitivity.

Podle Debyeho teorie o existenci jedné relaxační doby τ je frekvenční závislost vyjádřena vztahem:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{(1 + j\omega\tau)} \quad (2.8)$$

kde ε_s je statická permitivita, tedy permitivita při kmitočtech blízkých 0 Hz a ε_∞ znamená optickou permitivitu neboli permitivitu při kmitočtech pole blízkých optickým. Vztah mezi složkami ε_s a ε_∞ je:

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_\infty, \quad (2.9)$$



Obr. 2.3. Cole – Coleho kruhový diagram pro příklad platnosti Debyeho teorie

2.3.1 Permittivita tuhých izolantů

Nepolární tuhé izolanty se vyznačují tím, že je v nich jen elektronová polarizace a proto jejich permitivita je nejmenší ze všech skupin tuhých izolantů.

V tab. 2.3.1. jsou uvedené hodnoty permitivity některých nepolárních tuhých izolantů. V převážné většině tuhých nepolárních izolantů relativní permitivita má hodnotu v rozsahu od 1,8 až do 2,5. Jsou však i výjimky, jako diamant s relativní permitivitou 5,6 až 5,8; křemík 12,5; germanium 16; polovodivý cín 50 a další, přičemž ve všech těchto materiálech se vyskytuje jen elektronová polarizace, což je podmíněno skutečností, že vytvářejí kovalentní nepolární vazbu, bez dipólového momentu. Tato vazba je však přechodného typu mezi kovalentní a kovovou.

Permittivita nepolárních tuhých izolantů je frekvenčně nezávislá a teplotně téměř nezávislá, se vzrůstem teploty nepatrně klesá v důsledku teplotní roztažnosti, tj. se zmenšováním počtu částic (molekul) v jednotce objemu.

Název materiálu	ϵ_r
Parafin	1,9 až 2,2
Polystyrén	1,4 až 2,6
Síra	3,6 až 4,0
Diamant	5,6 až 5,8

Tab.2.3.1. Relativní permitivita nepolárních tuhých izolantů

Iontové krystaly a iontové polykrystalické látky mají elektronovou a iontovou polarizaci. Jejich permitivita se pohybuje v širokých mezích, jak je vidět z číselných údajů tab. 2.3.2. (při teplotě 20 °C).

Teplotní koeficient relativní permitivity iontových krystalů je ve většině případů kladný proto, že při zvýšení teploty se snižuje nejen hustota materiálu, ale vzrůstá i iontová polarizace a tím se zvyšuje permitivita.

Název krystalu	ϵ_r
NaCl	6
Korund Al_2O_3	10
Rutil TiO_2	110
Titanit kalcia $CaO \cdot TiO_2$	150

Tab. 2.3.2. Relativní permitivita iontových krystalů

Polární tuhé izolanty mají elektronovou i dipólovou polarizaci. Teplotní závislost jejich permitivity má složitý průběh. Pro teplotní a frekvenční závislosti permitivity polárních tuhých izolantů platí stejné zákonitosti jako pro polární kapalně izolanty.

Iontové amorfnní látky (organická skla), jako i iontové krystaly obsahující větší koncentraci poruch, mají elektronovou a iontovou a iontově relaxační polarizaci. Do této skupiny patří i některé keramické materiály, které obsahují sklovinu.

V tab. 2.3.3. jsou uvedené hodnoty relativní permitivity některých polárních tuhých izolantů a iontových amorfnních látek.

Název dipólového tuhého izolantu	ϵ_r
Polymetylmethylakrylát – organické sklo	4,5
Fenol-formaldehydová živice	4,5
Celulóza	6,5
Název anorganického skla	ϵ_r
Tavený kámen	4,5
Alkalické sklo	6,5
Bariérové sklo	10

Tab. 2.3.3. Hodnoty relativních permitivit polárních tuhých a iontových amorfnních látek (org. skel)

Feroelektrika, která mají elektronovou, iontovou, a samovolnou (spontánní) polarizaci, se vyznačují velmi vysokými hodnotami relativní permitivity, nejvyššími ze všech izolantů. Technicky používané keramické feroelektrické materiály mají hodnoty ϵ_r v rozmezích 1000 až 10000, v monokrystalech se vyskytují i vyšší hodnoty. Relativní permitivita je velmi závislá na teplotě, intenzitě elektrického pole, frekvenci, napětí, atd.

2.4 Dielektrické ztráty

2.4.1 Základní pojmy

Dielektrické ztráty vznikají v dielektriku působením elektrického pole. Podle zákona o zachování energie se část elektrické energie mění v teplo, kterým se dielektrikum zahřívá. Dielektrické ztráty vznikají vždy po připojení kondenzátoru s technickým dielektrikem na zdroj napětí. Vznikají ve stejnosměrném i střídavém poli.

Příčinou dielektrických ztrát jsou především pohyby volných i vázaných elektrických nábojů v dielektriku účinkem elektrického pole. Tyto pohyby se projevují jednak elektrickou vodivostí a jednak polarizací dielektrika. Významnou příčinou dielektrických ztrát je nehomogenita většiny dielektrik.

U stejnosměrného napětí mají rozhodující význam ztráty následkem vnitřní a povrchové vodivosti izolantu. Proud tekoucí izolantem způsobuje Joulovy ztráty, jejichž velikost je

$$P_{z,ss} = R_i \cdot I^2 = U^2 / R_i, \quad (2.10)$$

kde R_i značí izolační odpor a U je napětí na vzorku.

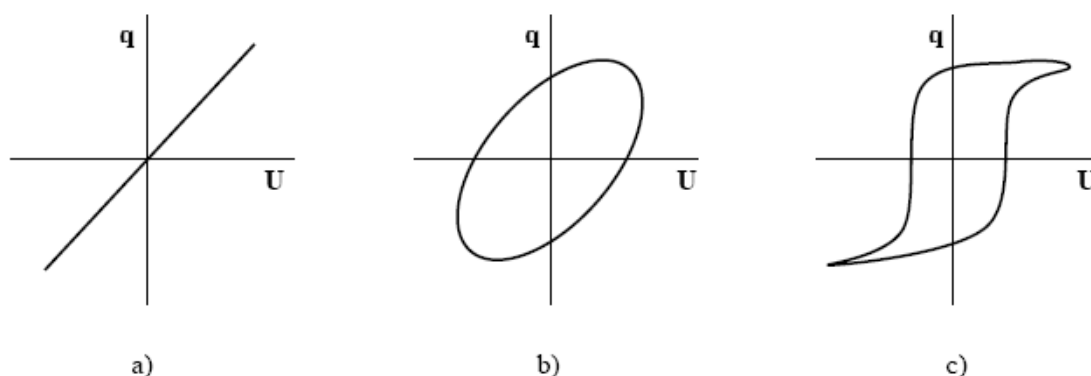
Pro studium polarizační složky dielektrických ztrát je vhodné sledovat závislost elektrického náboje na deskách kondenzátoru s dielektrikem z daného izolantu na připojeném napětí.

Jestliže je polarizační křivka dielektrických ztrát prakticky nulová, náboj je lineárně závislý na napětí. Tato situace je znázorněna na obr. 2.4.1a.

Jestliže se v izolantu tvořícím dielektrikum kondenzátoru vyskytuje některá z pomalejších polarizací, tj. polarizace spojená s dielektrickými ztrátami, pak křivka závislosti náboje na napětí bude mít tvar elipsy. Jak je možno vidět na obr. 2.4.1b Plocha

elipsy bude úměrná množství energie, která se za dobu jedné periody napětí přemění na teplo.

Jestliže dielektrikum kondenzátoru tvoří feroelektrický materiál, potom křivka závislosti náboje na elektrodách na napětí bude mít tvar hysterezní křivky podobné hysterezi křivce feromagnetických materiálů viz. obr. 2.4.1c [1]



obr. 2.4.1. Závislost elektrického náboje na deskách kondenzátoru s dielektrikem z izolačního materiálu na připojeném napětí.

a – bezztrátový izolant; b – izolant s dielektrickými ztrátami; c – feroelektrický materiál

2.4.2 Dielektrické ztráty v tuhých izolantech

V tuhých izolantech se vyskytují dielektrické ztráty vodivostní, polarizační a ionizační. Vodivostní dielektrické ztráty se vyskytují ve všech izolantech. Polarizační dielektrické ztráty se vyskytují jen v těch izolantech, ve kterých jsou polarizace spojené s dielektrickými ztrátami. Ionizační dielektrické ztráty se vyskytují jen v tuhých izolantech, které obsahují plynové, nejčastěji vzduchové bublinky.

Dielektrické ztráty v tuhých izolantech je potřeba zkoumat v souvislosti s jejich složením a strukturou. Přestože charakter polarizačních dielektrických ztrát v izolantech závisí na druhu polarizací, které se v nich vyskytují a přestože vodivostní ztráty se vyskytují ve všech izolantech, je vhodné používat stejnou klasifikaci tuhých izolantů jako při studiu jejich permitivity. Tuhé izolanty dělíme z hlediska charakteru dielektrických ztrát na pět následujících skupin, shodných s jejich klasifikací podle druhu polarizací:

Nepolární tuhé izolanty se skládají z molekul s kovalentními vazbami. Molekuly jsou bez permanentního elektrického dipólového momentu a neobsahují ani pohyblivé dipólové radikály. V těchto materiálech se vyskytuje jen elektronová polarizace, která je bezeztrátová a dielektrické ztráty jsou proto vodivostní. Jejich velikost závisí na velikosti elektrické vodivosti.

Z vodivostní povahy dielektrických ztrát v nepolárních tuhých izolantech vyplývá exponenciální vzrůst měrných dielektrických ztrát i ztrátového činitele $\tan \delta$ s růstem teploty, protože vodivost roste exponenciálně s teplotou. Důsledkem vodivostní povahy dielektrických ztrát je i nezávislost měrných dielektrických ztrát na frekvenci a pokles ztrátového činitele $\tan \delta$ s růstem frekvence. Teplotní a frekvenční závislost měrných dielektrických ztrát a ztrátového činitele $\tan \delta$ je principiálně stejná jako v nepolárních kapalných izolantech.

V technické praxi při výrobě a zpracování neutrálních tuhých izolantů je možné dodržet velkou čistotu a tím velmi nízkou hodnotu dielektrických ztrát. K těmto izolantům patří síra, parafín, nepolární polymery jako např.: polyetylén, polytetrafluoretylén (teflon), polystyrén a další. Vzhledem k velmi nízkým dielektrickým ztrátám se tyto materiály používají jako vysokofrekvenční izolanty.

Polární tuhé izolanty se skládají z molekul s kovalentními vazbami, ze kterých alespoň některé mají dipólový moment, nebo se vyskytují pohyblivé skupiny atomů (radikálů) s dipólovým momentem. V těchto materiálech se vyskytuje elektronová a dipólová polarizace. Dipólová polarizace je spojená s dielektrickými ztrátami. Dielektrické ztráty jsou proto polarizační i vodivostní. Pro vodivostní složku ztrát platí stejné zákonitosti jako pro vodivostní ztráty v nepolárních tuhých izolantech. Jediný rozdíl, který se týká většiny technicky používaných polárních tuhých izolantů v porovnání s nepolárními, bývá v tom, že koncentrace nečistot v polárních tuhých izolantech bývá větší než v nepolárních, přestože polární charakter látky se projevuje v silnější mezimolekulové interakci, v silnější přitažlivosti mezi dipólovými molekulami základní látky a iontovými molekulami nečistot. Polární látka působí jako „rozpuštědlo“ pro molekuly s iontovou vazbou, které se do ní dostanou snáze a špatně se od ní oddělují. Při chemických procesech výroby polárních tuhých izolantů se látky iontového charakteru používají často jako katalyzátory a zůstávají částečně ve finálním materiálu. Důsledek vyšší koncentrace nečistot je vyšší vodivost a vyšší vodivostní složka dielektrických ztrát.

Pro polarizační složku dielektrických ztrát polárních tuhých izolantů platí v podstatě stejné zákonitosti jako pro polarizační složku ztrát v polárních kapalných izolantech, až na menší odchylky. Jak v kapalných tak i v tuhých izolantech pohyb dipólů začíná až od určité teploty. Při nižších teplotách se dipóly nepohybují a polarizační složka ztrát je nulová. Při vyšší teplotě narůstá, prochází maximum a opět klesá. Ve frekvenční závislosti se též vyskytuje maximum polarizační složky ztrátového činitele $\tan \delta$. Vše zde uvedené se shoduje s polárními kapalinami. Polární kapaliny se skládají ze stejných molekul a polární tuhé látky se skládají obvykle s navzájem podobných molekul s různou molekulovou hmotností a různou délkou molekulového řetězce. To má za následek různé podmínky pro pohyb dipólů a různou relaxační dobu jednotlivých dipólů. V elektrických vlastnostech se toto projevuje nepříliš výraznou teplotní a frekvenční charakteristikou v závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele $\tan \delta$. Teplotní a frekvenční maximum ztrátového činitele $\tan \delta$ není tak ostré a vysoké jako v polárních kapalných izolantech, ale je rozloženo do širšího intervalu teplot a frekvencí.

Polární tuhé izolanty jsou největší skupinou izolantů. Patří k nim většina organických izolačních materiálů, jako jsou polární termoplastické a vytvrditelné živice, polyvinylchlorid, polymethylmetakrylát (organické sklo), polyamid, polyuretanové živice, kaučukové materiály, fenol-formaldehydové živice (bakelit), étery a estery celulózy, dále celulózové materiály, jako lepenka, papír, tvrzený papír, dřevo a celá řada dalších. Všechny mají značné dielektrické ztráty, zvláště při vyšších frekvencích.

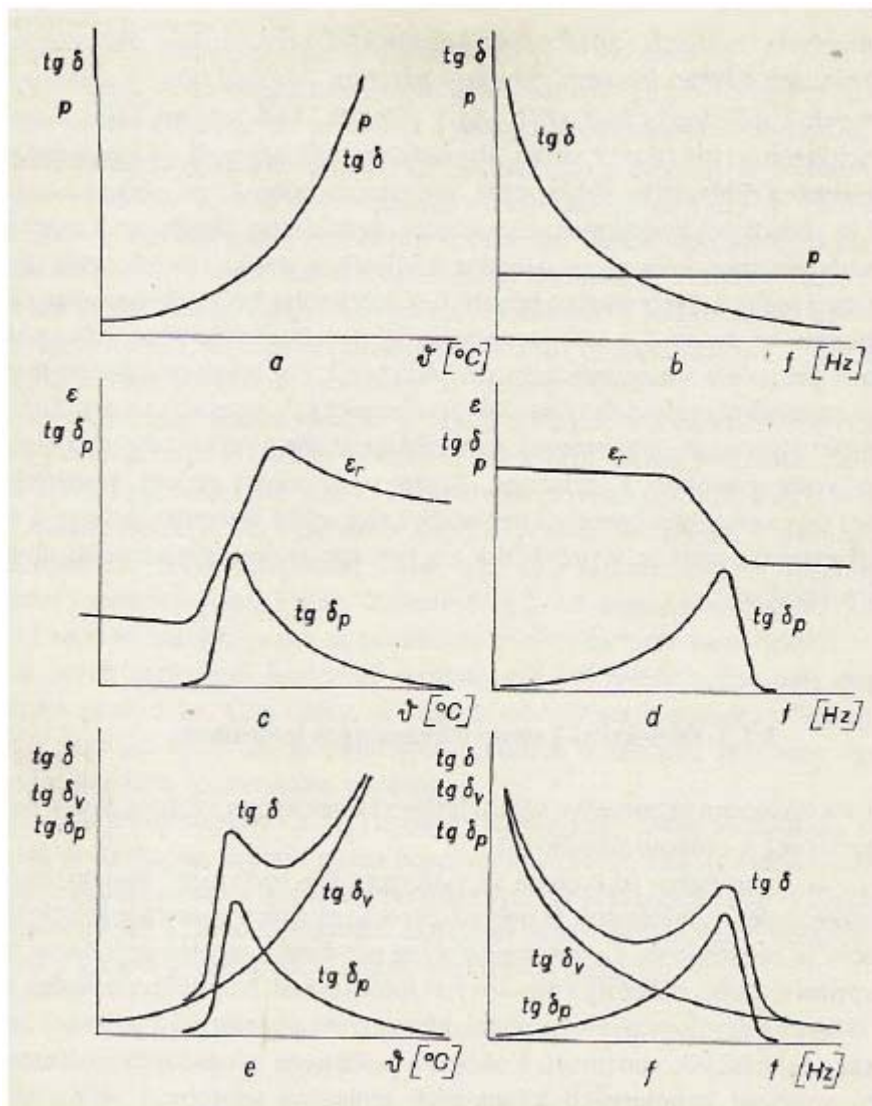
Iontové krystaly se skládají z kladných a záporných iontů vázaných iontovou chemickou vazbou. Mezi iontové krystaly patří (z hlediska elektrických vlastností) i takové krystaly, ve kterých se vyskytují iontové i kovalentní vazby (např. slída). V iontových krystalech se vyskytuje elektronová a iontová polarizace. Obě polarizace jsou bezztrátové. Dielektrické ztráty jsou jen vodivostní. V iontových krystalech s větší koncentrací poruch krystalové mřížky, jako i v iontových krystalech s netěsným uložením iontů se vyskytuje vedle elektronové a iontové pružné polarizace i polarizace iontové relaxační, která je spojena s dielektrickými ztrátami. Tyto krystaly s hlediska elektrických vlastností přiřazujeme k následující skupině.

Amorfní iontové látky se skládají z kladných a záporných iontů vázaných iontovou chemickou vazbou, přičemž ionty nejsou uspořádané do pravidelné krystalové mřížky. Záporné ionty jsou obvykle velké komplexní ionty složené z mnoha atomů vázaných navzájem kovalentní vazbou. Hlavní skupinou amorfních iontových látek jsou anorganická skla. V amorfních iontových látkách se vyskytuje elektronová i iontová

relaxační polarizace. Iontová relaxační polarizace je spojená s dielektrickými ztrátami. Dielektrické ztráty v amorfních iontových látkách jsou tedy vodivostní a polarizační.

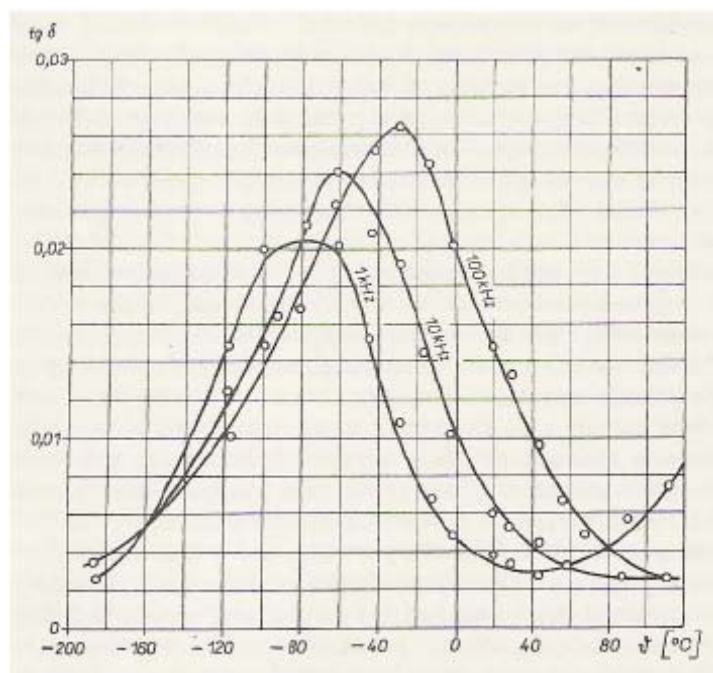
Feroelektrika tvoří malou skupinu iontových krystalů, ve kterých se kromě elektronové a iontové polarizace vyskytuje i spontánní polarizace. První dvě polarizace jsou bezztrátové, třetí je spojená s dielektrickými ztrátami. Dielektrické ztráty ve feroelektrických materiálech jsou tedy vodivostní a polarizační.

Ve všech skupinách tuhých izolantů jsme zatím předpokládali homogenní materiál. V případě nehomogenních materiálů přistupuje migrační polarizace a s ní spojené další polarizační ztráty, které jsou velmi významné, zvláště v materiálech s výrazně nehomogenní strukturou, jako jsou např. izolanty s vrstevitou strukturou. Jestliže jsou v nehomogenních izolačních materiálech plynové a nebo vzduchové bublinky a intenzita elektrického pole působícího na izolační materiál je dostatečně vysoká, vyskytují se i ionizační ztráty. Při vysokých frekvencích se navíc vyskytuje rezonanční polarizace a s ní i spojené polarizační dielektrické ztráty, které nazýváme rezonančními ztrátami.



Obr. 2.4.2. Teplotní (a,c,e) a frekvenční (b,d,f) závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ měrných dielektrických ztrát „p“ a relativní permitivity ϵ_r [1]

- a,b - vodivostní složka dielektrických ztrát
- c,d - polarizační složka dielektrických ztrát
- e, f - součet vodivostní a polarizační složky ztrátového činitele



Obr 2.4.3. Závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ papíru při různých frekvencích [1]

2.5 Elektrická pevnost izolantů

Každá elektrická izolace, každý výrobek z elektroizolačního materiálu snáší namáhání elektrickým napětím jen do určité míry. Jestliže napětí překročí určitou hodnotu, nastane průraz izolace. Napětí nazýváme průrazným napětím U_p a odpovídající hodnotu intenzity elektrického pole v okamžiku průrazu nazýváme elektrickou pevností E_p izolantu. V případě homogenního elektrického pole je intenzita elektrického pole na celé dráze průrazu stejná a proto pevnost vypočítáme podle vzorce: $E_p = U_p / d$, kde d je vzdálenost mezi elektrodami. V případě nehomogenního elektrického pole elektrickou pevnost vypočítáme v technické praxi podle stejného vzorce.

2.5.1 Elektrická pevnost tuhých izolantů

Průraz izolačního materiálu znamená náhlý vzrůst jeho elektrické vodivosti, čímž izolant ztrácí vlastnosti izolantu. Důsledkem náhlého vzrůstu vodivosti a náhlého zvýšení proudu protékajícího izolantem jsou tepelné a mechanické děje. Rozlišujeme dvě etapy, dvě stádia průrazu. Prvním stádiem je náhlý vzrůst elektrické vodivosti a náhlý vzrůst proudu protékajícího v místě průrazu. Izolant už v prvním stádiu ztrácí vlastnosti izolantu. Do druhého stádia průrazu patří všechny děje, které se odehrají jako důsledek protékání značného elektrického proudu v místě průrazu: propálení vodivé cesty

v organickém tuhém izolantu, vznik vnitřních napětí a prasknutí křehkých anorganických izolantů, jako porcelán, sklo, atd.

V případě, že se mezi elektrodami nachází tuhý elektroizolační materiál, tvar elektrického pole ovlivňují i elektrické vlastnosti obklopujícího prostředí.

Průraz tuhých izolantů může být způsoben elektrickými a nebo tepelnými procesy odehrávajícími se vlivem elektrického pole.

Čistě elektrický průraz tuhých izolantů souvisí s elektrickými procesy v izolantu vznikajícími v silném elektrickém poli a vedoucími k náhlému rychlému vzrůstu proudové hustoty v okamžiku průrazu.

Tepelný průraz tuhých izolantů je důsledkem tepelné elektrické nerovnováhy izolantu. Izolant se v elektrickém poli zahřívá dielektrickými ztrátami, což vede k zvýšení ztrátového činitele $\tan \delta$ se vzrůstající teplotou a k dalšímu vzrůstání teploty izolantu. Důsledkem může být tepelně-elektrická rovnováha, kdy množství vznikajícího tepla je stejné jako množství tepla odváděného do okolí a nebo tepelně-elektrická nerovnováha, která vede k neomezenému vzrůstání teploty a tepelnému rozkladu tuhého izolantu.

2.6 Anorganické izolanty

2.6.1 Slída

Pro různé elektrotechnické výrobky, především však pro elektrické stroje, zůstává slída nejpoužívanějším izolantem, neboť dovoluje větší tepelné i elektrické namáhání. Svým složením patří k minerálům hlinitokřemičitým. Složení slídy se mění podle původu. Jsou to kombinace oxidů křemičitých, hořečnatých, draselných, železitých i dalších. Z četných nalezišť slídy jsou nejdůležitější v Indii, Kanadě, USA a na Madagaskaru.

Při dobývání slídy se dbá na nejmenší porušení krystalu. Slída očištěná zhruba od hlušin se nazývá surová, bloková či kusová. Po odstranění vadných krystalů se slída štípe. Štípaná slída se třídí podle velikosti plochy. Hodnotí se jak podle velikostí listů, tak i podle jakosti tzn. podle obsahu cizích těles a barevných skvrn. Velikost lístků je rozdělena do základních skupin podle plochy největšího obdélníku, který lze z plátků vyříznout (od 6,5 až do 645 cm²).

Podle zpracování lze slídu rozdělit na surovou, štípanou, slídový prach a slídu upravenou tzv. remiku. Krystalická struktura slídy umožňuje její výbornou štípatelnost a lze dosáhnout tloušťky slídových plátek až 0,005 mm. Slídové plátky jsou ohebné a pružné, chemicky stálé a mechanicky pevné.

2.6.2 Slída pro elektrotechniku

Z různých druhů slíd jsou pro materiály používané v elektrotechnických zařízeních nejdůležitější muskovit a flogopit.

Muskovit, nazývaný též draselná slída, je kyselý křemičitan hlinitodraselný. Je to bezbarvý nebo mírně růžový, popř. hnědý i zelený podle oxidů, které jsou v něm obsaženy. Je ohebný, mechanicky pevný, použitelný do teploty 500 až 600 °C. Při vyšších teplotách uniká krystalická voda a slída ztrácí průhlednost, křehne a rozrušuje se.

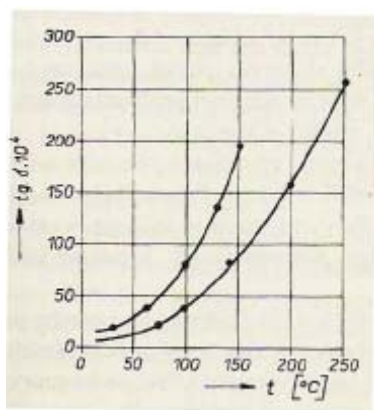
Pro dobré elektrické vlastnosti, vysokou permitivitu ($\epsilon = 6$ až 7) a nízký ztrátový činitel, který se téměř nemění v širokém rozmezí teplot i kmitočtu, používá se muskovitu jako dielektrika v kondenzátorech. Pro vysokou elektrickou pevnost je pak důležitým izolačním materiálem v elektrických strojích.

Flogopit tzv. hořečnatá slída je kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý. Je jantarové, zlatové, popř. zelené až šedivé barvy, která se podle příměsí opět mění. Flogopit má v porovnání s muskovitem nižší elektrickou vodivost a větší tepelnou stálost při vyšších provozních teplotách. Můžeme ho použít až do 800 °C. Teprve nad 900 °C se tepelně rozrušuje a křehne. Větší tepelná stabilita oproti muskovitu je způsobena nahrazením hydroxylových skupin atomem fluoru. Je měkčí a ohebnější než muskovit. Hlavní naleziště jsou na Madagaskaru, v Kanadě a v USA. Souhrnné vlastnosti muskovitu a flogopitu jsou uvedeny v tab. 2.6.2. [1]

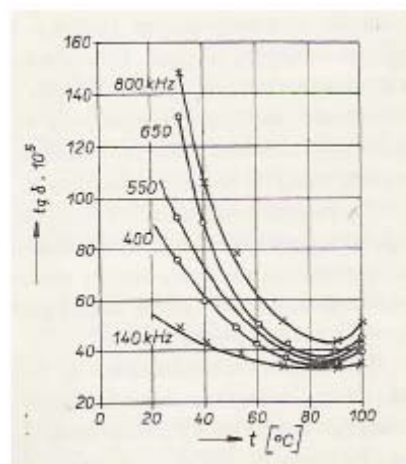
Vlastnost	Jednotka	Muskovit	Flogopit
Hustota	Kg m ⁻³	(2,7 až 3,2) 10 ³	(2,6 až 2,8) 10 ³
Tvrdost podle Mohse		2,5 až 3,2	2,4 až 2,7
Kalcinační teplota	°C	700 až 800	900 až 1000
Měrná tepelná vodivost	Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,3 až 0,56	0,5 až 0,6
Ztrátový činitel tg δ		1 až 3.10 ⁻⁴	10 až 50.10 ⁻⁴
Elektrická pevnost (při TL. 1mm)	kV mm ⁻¹	60	45
Permitivita ϵ		6 až 7	5 až 6
Měrný vnitřní odpor	Ω cm	15 ¹⁵ až 10 ¹⁶	10 ¹² až 10 ¹⁴
Maximální provozní teplota	°C	500 až 600	800 až 900
Stlačení v % při tlaku 40 MPa	%	3	3
Stlačení v % při tlaku 85 MPa	%	3,5	3,5

Tab. 2.6.2. Vlastnosti muskovitu a flogopitu

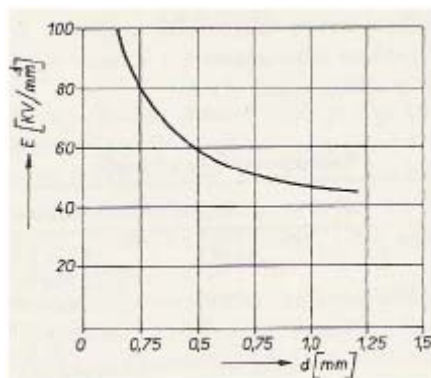
Jak se ukázalo u slídivých kondenzátorů, je stabilita slídivé izolace během doby ovlivněna vnikáním vlhkosti i změnami tlaků spojených s jejich konstrukcí. Tato nestabilita se projevuje růstem kapacity, vyvolané změnou kladného tepelného koeficientu permitivity, který se s teplotou mění v intervalu $1 \cdot 10^{-5} \sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Ztrátový činitel muskovitu je ovlivněn teplotou i kmitočtem. Jak ukazuje obrázek obr. 2.7.2a. vzrůstá $\text{tg } \delta$ při nižším konstantním kmitočtu se stoupající teplotou dost prudce. Při vyšších kmitočtech však vzrůstem teploty $\text{tg } \delta$ klesá podle průběhu znázorněného obr. 2.6.2b. Elektrická pevnost slídy se podstatně nezhoršuje v rozmezí od teploty normální do tzv. teploty přechodové, kritické (u muskovitu kolem $400 \text{ } ^\circ\text{C}$, u flogopitu $450 \text{ } ^\circ\text{C}$), do které pak klesá. Vliv tloušťky na elektrickou pevnost je v normálních zkušebních podmínkách podstatný, jak ukazuje obr. 2.6.2c.



Obr 2.6.2a. Průběh ztrátového činitele dvou druhů muskovitů v závislosti na teplotě [1]



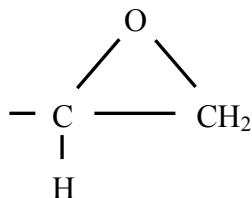
Obr 2.6.2b. Průběh ztrátového činitele muskovitu v závislosti na teplotě při 140 až 800 kHz [1]



Obr 2.6.2c. Elektrická pevnost muskovitu v závislosti na tloušťce [1]

2.7 Epoxidová pryskyřice

Pryskyřice zvaná epoxidová vzniká kondenzací dianu (hydroxifenylpropanu) s epichloridrinem, jelikož obsahuje na koncích makromolekuly epoxidové skupiny :



Vzniklé makromolekuly jsou převážně lineární. Pryskyřice je termoplastická, rozpouští se v organických rozpouštědlech a nemá dostatečné mechanické vlastnosti. Použití je možné až po zesítnění, které nastane po přidání tzv. tvrdidla, kdy zmíněná epoxidová skupina buď adičně reaguje s látkami, které obsahují pohyblivý vodík nebo katalyzačním účinkem vhodných látek polymeruje.

Použité tvrdidlo rozhoduje o vlastnostech vytvrzené epoxidové pryskyřice, jakož i o potřebné vytvrzovací teplotě a době. Dobré elektroizolační vlastnosti, získávají pryskyřice při použití tvrdidla s aromatickými jádry (např. anhydrit kyseliny ftalové). Druh tvrdidla rozhoduje též o chemické a tepelné odolnosti i smrštivosti pryskyřice. Vlastnosti se však také mění teplotou a dobou potřebnou pro vytvrzování.

K vytvrzení epoxidových pryskyřic lze použít i fenolických močovinových a melaminových pryskyřic, které zlepšují chemickou a tepelnou odolnost.

Elektrická pevnost je kolem 25 kV mm^{-1} , permitivita 3,5 až 4, ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ přibližně 0,01, tepelná odolnost v rozmezí -60 až 260°C .

Zmíněné dobré vlastnosti, které jsou doplněny dobrou odolností proti vlhku a plísním, malou paropropustností vodních par, jakož i výbornou adhezí i kohezí, zajišťují široké použití epoxidových pryskyřic i v elektrotechnickém průmyslu.

Zde se používají jako:

- a) elektroizolační laky
- b) lepidla, po výbornou adhezi
- c) nejvíce jako lící pryskyřice

2.7.1 Epoxidové laky

Jsou hlavně používány jako látky impregnační a lepicí. Mají normálně velmi málo rozpouštědel (pod 10 %), nebo je vůbec neobsahují, jako např. látky tzv. bezrozpouštědlové. Při jejich použití ve spojení s elektroizolací stejných tříd se dosahuje vyšší tepelné odolnosti. Jelikož neobsahují rozpouštědla, dociluje se při nich 100% plnění prostor. Impregnační technologie se může změnit na odstředivý princip pronikání impregnantu. Epoxidové pryskyřice se v přípravě laku široce uplatnily, neboť vyhověly podmínkám odolnosti vlhkostí a oděru při dobrých elektroizolačních vlastnostech.

Jako lepidla musí mít epoxidové pryskyřice :

- a) dobrou adhezi k hladkým povrchům
- b) dobrou kohezi po vytvrzení
- c) předlouhé životnosti i chemická odolnost
- d) snadnou zpracovatelnost
- e) dobré elektroizolační vlastnosti
- f) nesmějí vykazovat smrštitivost

Lepicí technika má v elektrotechnice mnohostranné využití. Tak např. slepené vrstvy skelných tkanin tvoří pevné sklolamináty, slepené plechy točivých strojů, transformátorů a tlumivek zářivek snižují jejich chvění. Lepením je často nahrazováno spojování nýtováním, letováním i svařováním, přičemž jsou spoje prachotěsné a vakuotěsné.

2.7.2 Licí epoxidové pryskyřice

Nejvíce se epoxidových pryskyřic využívá jako lepicích hmot. Proti jiným lepicím pryskyřicím mají tyto výhody:

- Při licí teplotě jsou málo viskózní a velmi dobře zatékají
- Jejich odlévání a vytvrzování je možné bez tlaku, protože se při vytvrzování netvoří vedlejší zplodiny.

Některé lze odlévat a vytvrzovat při pokojové teplotě. Mají velmi malé objemové změny. Jsou dobře přilnavé. Vytvrzené mají dobré elektrické mechanické i chemické vlastnosti. Jsou netečné vůči chlorovým derivátům difenilu (clophen) a odolné proti mořské vodě i proti korónovému výboji.

Povrch vytvrzené pryskyřice je hydrofobní. Povrchový odpor přibližně $10^{15} \Omega$, vnitřní měrný odpor $10^{-16} \Omega \cdot \text{cm}$. Jsou snadno zpracovatelné.

Příprava licí pryskyřice záleží na jejím roztopením a odstranění vzdušných bublin při použití mírného vakua nebo přechodného zvýšení teploty. Pro zvýšení mechanických a teplotních vlastností se v další úpravě přidávají vhodná plniva, z nichž nejdůležitějším jsou taková, která obsahují křemen. Před odléváním se přidává v předepsaném množství tvrdidlo. Doba po kterou zůstává pryskyřice schopna odlévání, se nazývá licí životnost.

K vyjmutí odlitku z formy je potřeba oddělit odlitek od formy separační vrstvou, provedenou ze silikonového laku nebo vazelíny. Při lití je hlavně nutné zabránit tvoření bublin.

Vytvrzování odlitků se provádí podle druhu pryskyřice buď za tepla, nebo při normální teplotě. Vzhledem k exotermní reakci vznikající při vytvrzování je lépe volit vytvrzovací teplotu nižší k vyrovnání uvolněného tepla.

Pro celkově dobré vlastnosti elektrické, mechanické i tepelné, pro jednoduchost tvarování i zalévání např. kovových částí je použití licích pryskyřic v elektrotechnice mnohostranné. Tak např. jako náhrada porcelánu se odlévají z plněných pryskyřic podpěrné izolátory, za tvrzený papír komory maloolejových vypínačů, zalévají se pólové cívky elektrických strojů i celá vinutí strojů vystavených vlivům prostředí. Zalévá se také vinutí měřicích transformátorů.

Polotovary vyrobené z licí pryskyřice, jako desky, tyče a trubky jsou pak konstrukčním materiálem ve stavbě elektrických přístrojů. Další využití epoxidových pryskyřic je ve výrobě skelných laminátů, kterých se užívá i u silně namáhaných elektrických strojů, nebo jako podkladový materiál plošných strojů. [1]

3 Experimentální část

3.1 Příprava experimentálních vzorků

Experimentální vzorky se skládají z epoxidové, zalévací hmoty a práškového muskovitu. Obsah muskovitu ve vzorcích je 0, 20, 30 % a jejich tloušťka je 2 mm.

Vzorky byly vyhotoveny pomocí lící epoxidové hmoty, do které bylo nejprve přimícháno plnivo v patřičném hmotnostním množství. Takto připravená hmota byla vakuována, pro odstranění vzduchových bublin. Vzduchové bubliny, by měly zcela zásadní vliv na naměřené hodnoty a došlo by tak k velkým nepřesnostem vlastního měření. Po vakuování předchystané hmoty proběhlo samotné odlévání vzorků, při teplotě 60 °C v předeřtáté kovové formě. Pro snadné vyjmutí vzorku, byla tato forma předem vytřena silikonovou vazelínou. Celá forma byla opět vytavena vakuováním a následně byla vložena do pece s teplotou 80 °C po dobu dvou hodin. Následně byla pak opět vystavena zvýšené teplotě 140 °C po dobu osmi hodin pro dotvrzení vzorků.

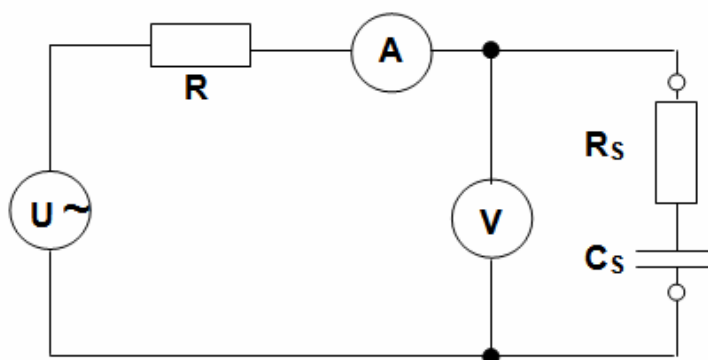
3.2 Podmínky měření

Zhotovené vzorky byly umístěny do exsikátoru s vysušeným molekulovým sítem. Vzorky byly ponechány v exsikátoru po celou dobu experimentu a vyjmut byl vždy jeden vzorek až těsně před vlastním měřením. Pro dobrou stabilitu okolního prostředí v průběhu měření byl tříelektrodový systém umístěn v přípravku Tettex, jehož součástí je tříelektrodový systém, v němž měřicí elektroda měla průměr 30 mm a šířka mezery mezi měřicí a ochrannou elektrodou byla 1 mm. Pro potlačení případné navlhavosti vzorků, byl tříelektrodový systém během měření obložen sáčky s vysušeným molekulovým sítem, které měly za úkol případnou vlhkost pohltit.

3.3 Měřicí zařízení

Měření probíhalo na přesném RLCG metru HP 4284 Hawlett Packard, jehož frekvenční rozsah je 20 Hz až 1 MHz. Použitý přístroj HP 4284 je vybaven korekcemi, které slouží k přesnému nastavení počátečního stavu elektrodového systému. Jedná se o korekce OPEN, SHORT, LOAD. Před měřením každého vzorku se tedy provede kalibrace, při které přístroj změří tzv. rozptylovou admitanci – korekce OPEN a zbytkovou impedanci – korekce SHORT. Bez použití korekcí by se měření jevílo jako

zdánlivě věrohodné, ale po pečlivějším prozkoumání by se zjistilo, že do něj jsou zahrnuty veškeré nežádoucí parazitní vlivy, jako kapacita mezi vodiči a jejich odpor, které výsledek zkreslují a znehodnocují. Výstupní data naměřených hodnot kapacity a ztrátového činitele se ukládají jako soubor v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Principiální zapojení přístroje je uvedeno na obr. 3.1, měřený vzorek je nahrazen náhradním sériovým obvodem, tvořeným rezistorem R_s a kapacitou C_s .



Obr. 3.1 Vnitřní zapojení LCR metru HP 4284A

Přesnost měření je 0,05 % pro měření kapacity a 0,0005 % pro měření ztrátového činitele. Rozlišení přístroje je 6 digitů. Jelikož chyby měření pro C a $\tan \delta$ u nízkých kmitočtů jsou příliš velké, je nutné omezit kmitočtové pásmo pro měření na 100 Hz až 1 MHz.

Při měření byl vyhodnocen proud protékající normálovým rezistorem R a napětí na přiloženém vzorku. Hodnoty napětí a proudu byly přepočteny procesorem přístroje na kapacitu a ztrátový činitel.

3.4 Postup měření

Počáteční teplota měření byla vždy teplota okolí, která se pohybovala v intervalu od 21 °C do 23 °C. Následně byl zapnut regulátor vytápění a na něm nastavena příslušná teplota. Pro toto měření byl zvolen interval teplot od počáteční teploty (21 °C až 23 °C) do 120 °C, s krokem 20 °C. Po dosažení nastavené teploty bylo potřeba vyčkat alespoň 30 minut, aby se prohřál celý elektrodový systém a bylo tak zaručeno, že naměřené hodnoty odpovídají nastavené teplotě. Při vyšší teplotě bylo její udržení po dobu 30 minut velice náročné, vzhledem k nutnosti vypínání regulátoru při vlastním měření, což mělo za následek možné přechodné snížení teploty.

3.5 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty ztrátového činitele $\tan \delta$ byly zaznamenány do tabulek a vyneseny do grafů. Pro odstranění případných odchylek měření byl každý vzorek změřen třikrát po sobě. Z těchto tří měření byla vypočtena výsledná průměrná hodnota.

3.5.1 Vliv teploty na dielektrické vlastnosti materiálů

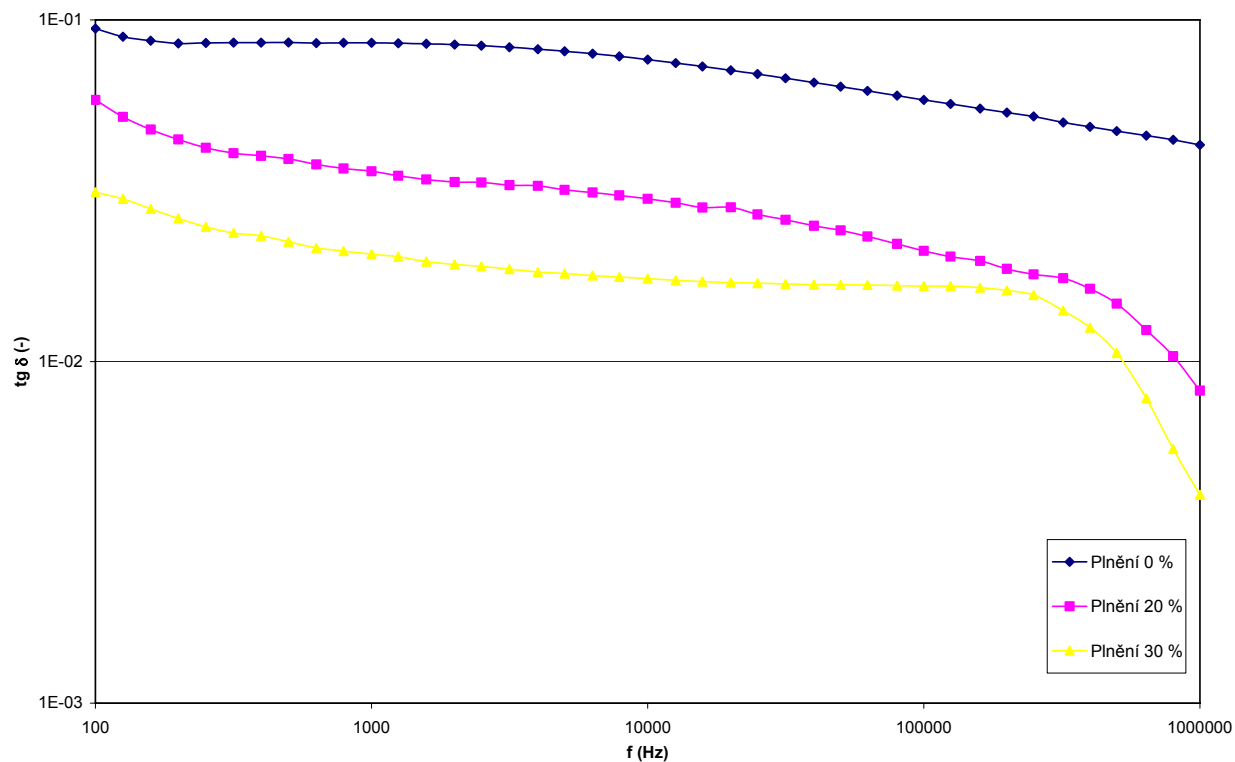
Při experimentu byly proměřeny vzorky při teplotách 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C a 120 °C. Naměřené hodnoty byly sestaveny do tabulek pomocí MS Excel a následně byly vypočteny průměrné hodnoty dielektrických veličin vždy pro danou sadu vzorků.

Z naměřených a vypočtených výsledků byly sestaveny grafické závislosti. Z důvodu přehlednosti byly do předložené práce vybrány závislosti jen pro několik hodnot teploty. Uvedení všech naměřených hodnot se v některých případech ukázalo jako nepřehledné. Na obr. 3.5.3 je zachycena frekvenční závislost ztrátového činitele vzorku s plněním 0 % pro výše zmiňované teploty. Relaxační maxima jsou zde patrná v oblasti nízkých kmitočtů a v dané grafické závislosti se začínají projevovat až při teplotě 80 °C a vyšší. U vzorku s plněním 30 % se relaxační maxima na frekvenční ose posunují k nižším kmitočtům, oproti vzorku s plněním 0 %. Průběhy ztrátového činitele pro vzorek s plněním 30 % je možno vidět na obrázku 3.5.4. Závislost relativní permitivity pro vzorek s plněním 0 % je znázorněna na obrázku 3.5.7. Při teplotách 20 °C, 40 °C, 60 °C a 80 °C mají závislosti pozvolna klesající, hladký průběh a je zachován i vzrůstající trend v závislosti na uváděné teplotě. Odlišné průběhy vykazují závislosti při teplotách 100 °C a 120 °C, kdy v oblasti nízkých kmitočtů dochází k prudkému nárůstu hodnot relativní permitivity. Na obr. 3.5.8 je pak možno vidět kmitočtovou závislost relativní permitivity pro vzorek s plněním 30 %. Uvedené závislosti jsou téměř shodné s průběhy zjištěnými na vzorku s plněním 0 %. Vliv slídového plniva se projevil pouze mírným zvýšením hodnot relativní permitivity, především v oblasti nižších kmitočtů. Lze říci, že plnění, u těchto experimentálních vzorků má jen malý vliv na relativní permitivitu. Kmitočtové závislosti ztrátového čísla pro zvolená plnění jsou zachyceny na obr. 3.5.11 a 3.5.12. V grafu pro vzorek s 0% plněním lze pozorovat téměř konstantní průběhy hodnot pro teploty 20 °C, 40 °C, 60 °C, pro teploty vyšší již je možno vidět relaxační maxima měřené frekvenční oblasti. Průběhy frekvenčních závislostí ztrátového čísla vzorku s 30% plněním mají mírně odlišný charakter. Závislosti pro nižší teploty jsou opět bez

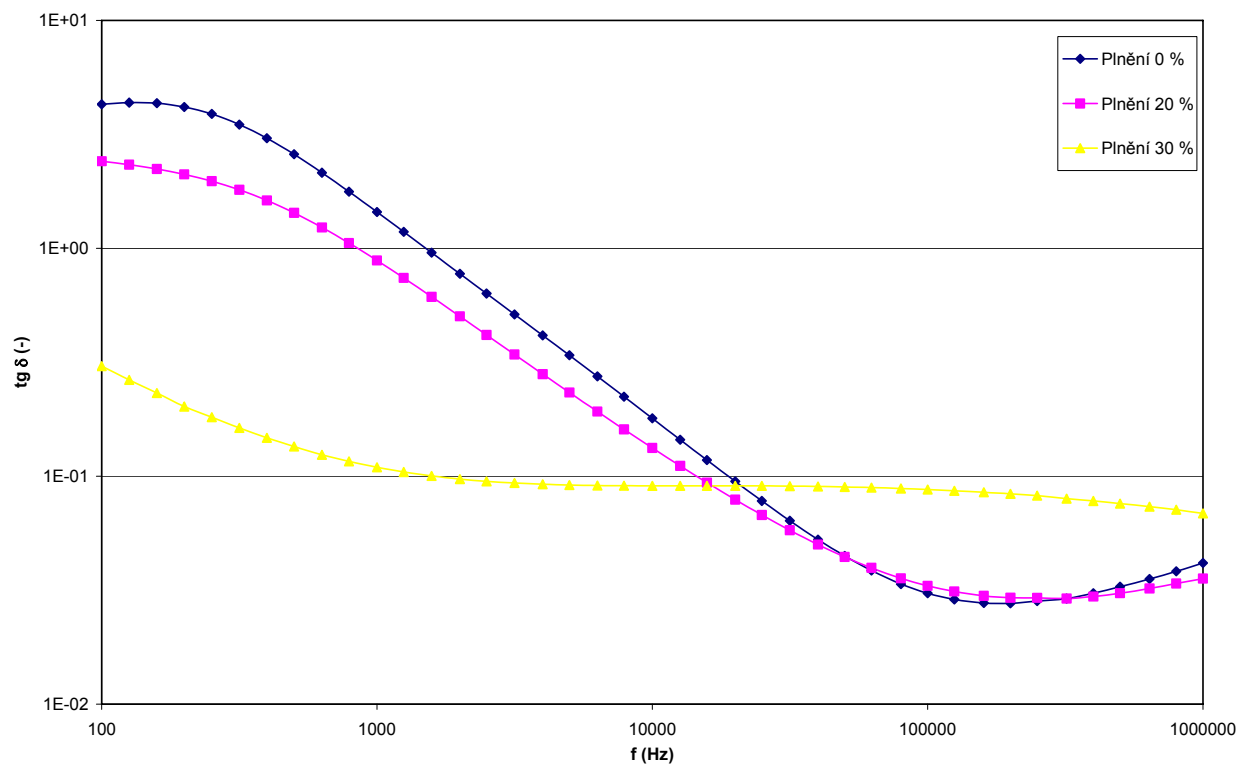
relaxačních maxim v daném rozsahu frekvencí, avšak mají mírně klesající charakter. Relaxační maxima pro vyšší teploty jsou méně výrazná než v předchozím případě.

3.5.2 Vliv plnění na dielektrické vlastnosti materiálů

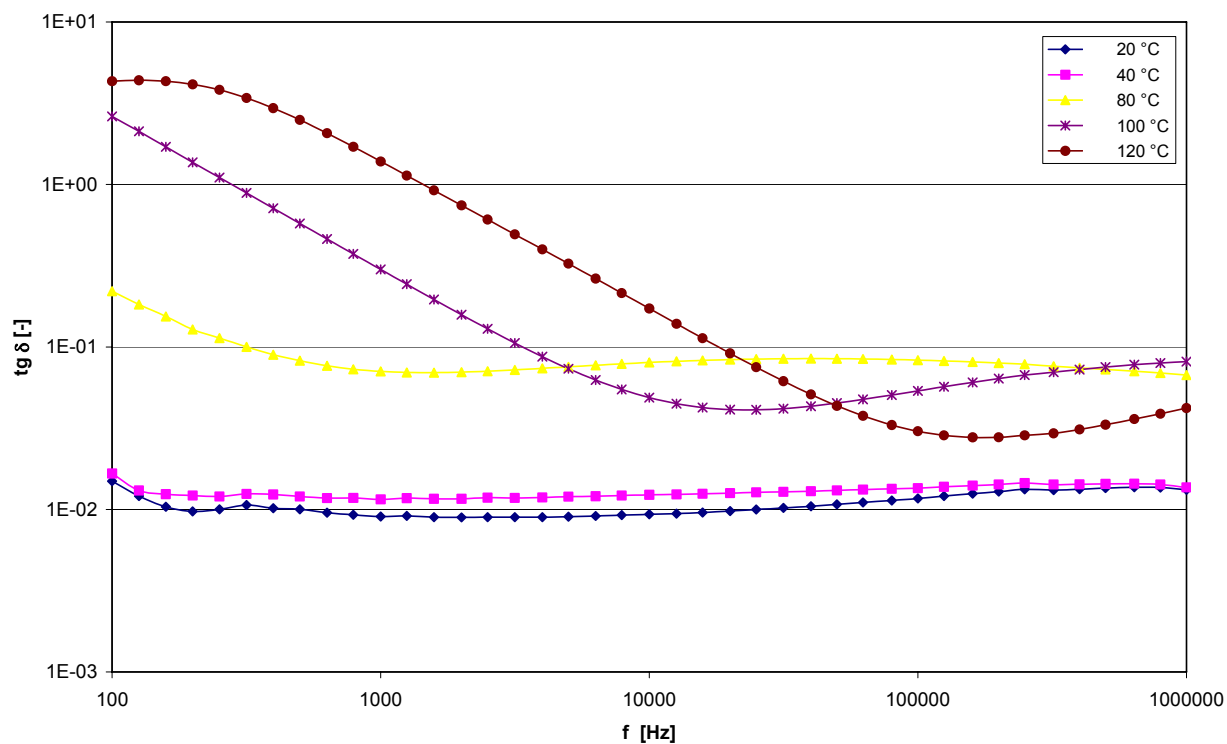
Z naměřených a vypočtených výsledků byly opět sestaveny grafické závislosti. Pro ilustraci jsou uváděny závislosti pro teplotu 40 °C a 120 °C. Na obrázku 3.5.1 je znázorněna závislost ztrátového činitele na frekvenci pro vzorky s plněním 0 %, 20 % a 30 %. Při teplotě 40 °C se relaxační maximum ztrátového činitele vzorků s plněním 0 % a 20 % téměř neprojevuje. Nepatrně vzrůstá ztrátový činitel až u materiálu s plněním 30 %. Na obr. 3.5.2 je pak zobrazen ztrátový činitel pro teplotu 120 °C a zde je již možno vidět znatelná relaxační maxima pro všechna plnění. Nejvyšší relaxační maximum ztrátového činitele bylo zaznamenáno pro frekvenci $3 \cdot 10^2$ Hz u vzorku s plněním 0 %. Obr. 3.5.5 znázorňuje závislost relativní permitivity na frekvenci. Při teplotě 40 °C se relativní permitivita zvyšuje úměrně s procentním plněním. Mírnou odchylku vykazuje vzorek s 30% plněním v oblasti nižších kmitočtů. Při teplotě 120 °C se opět relativní permitivita s rostoucím procentem plnění zvyšuje. V oblasti nižších kmitočtů však při této teplotě dochází k prudkému vzrůstu hodnot relativní permitivity. Vzhledem ke skutečnosti, že tomuto nárůstu dochází u všech vzorků, lze tento jev připisovat změnám vnitřních vlastností matrice. Plnivo nebude mít pravděpodobně na prudký vzrůst relativní permitivity podstatný vliv. Od frekvence $1 \cdot 10^3$ Hz má závislost relativní primitivity podobný průběh jako při nižších teplotách. Závislost ztrátového čísla na frekvenci je zobrazena na obr. 3.5.9 a 3.5.10 pro zvolené teploty. Při teplotě 40°C mají závislosti ztrátového čísla klesající charakter, který naznačuje existenci relaxačního maxima v oblasti nízkých kmitočtů. Na hodnoty ztrátového čísla při teplotě 120°C v oblasti kmitočtů do 1000 Hz má podstatný vliv již zmiňovaný velký nárůst relativní permitivity.



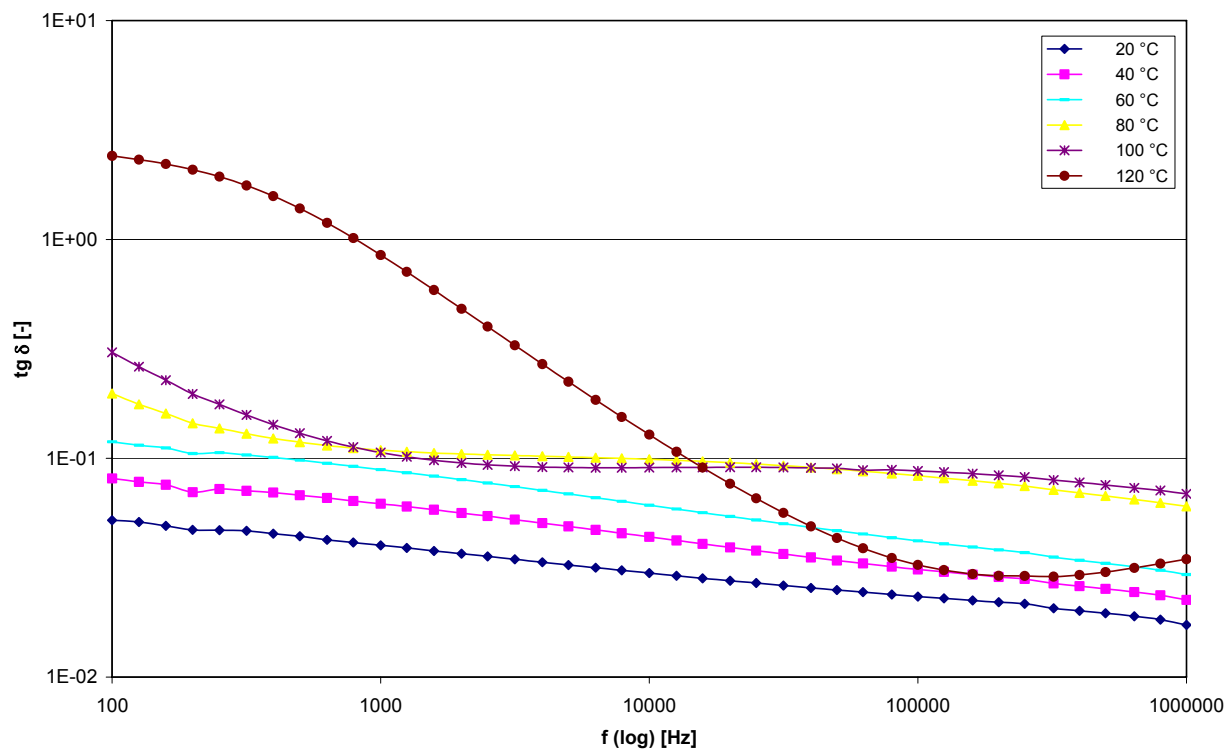
Obr. 3.5.1 Frekvenční závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, při teplotě $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$



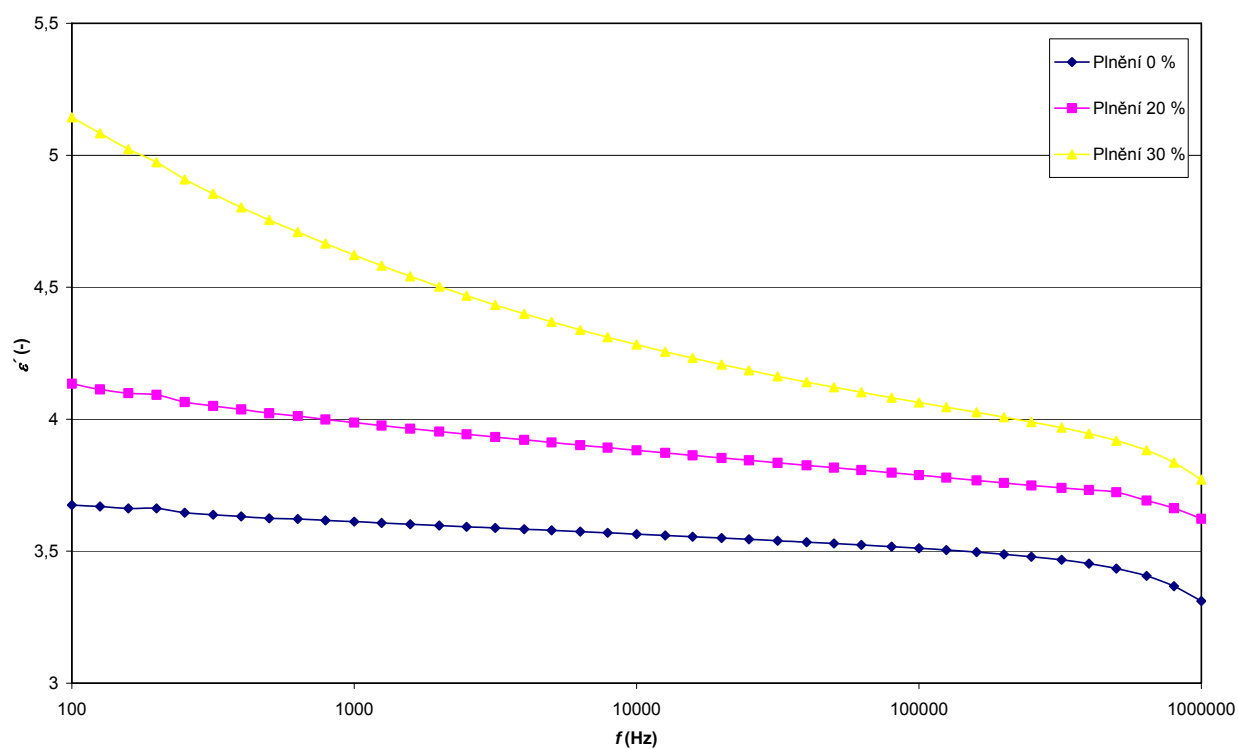
Obr. 3.5.2 Frekvenční závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, při teplotě $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$



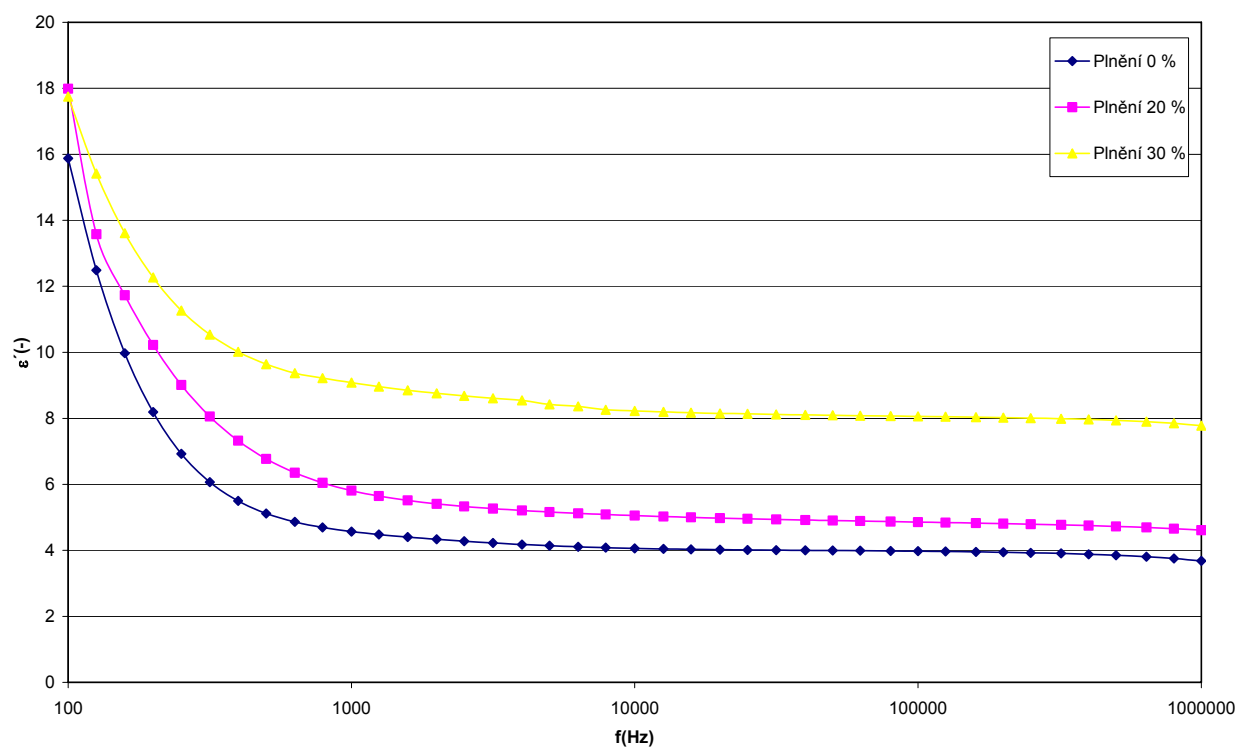
Obr. 3.5.3 Frekvenční závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, při plnění 0 %



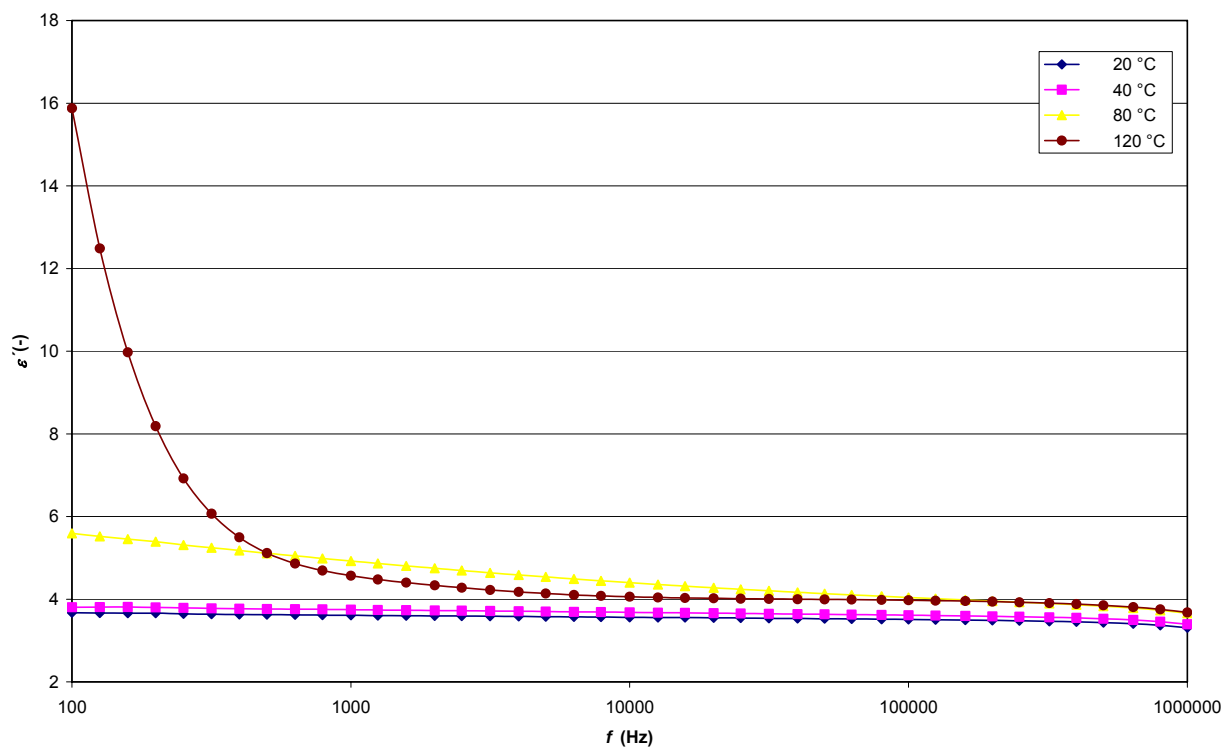
Obr. 3.5.4 Frekvenční závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, při plnění 30 %



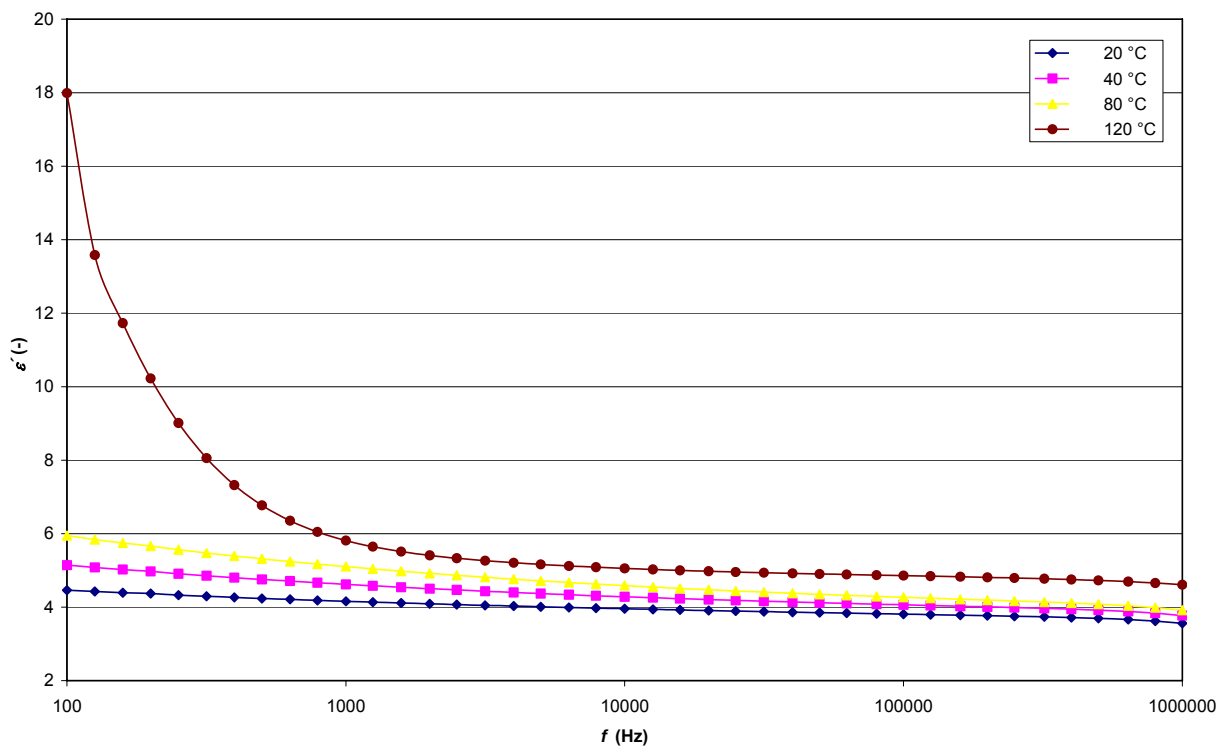
Obr. 3.5.5 Frekvenční závislost relativní permitivity ϵ' , při teplotě $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$



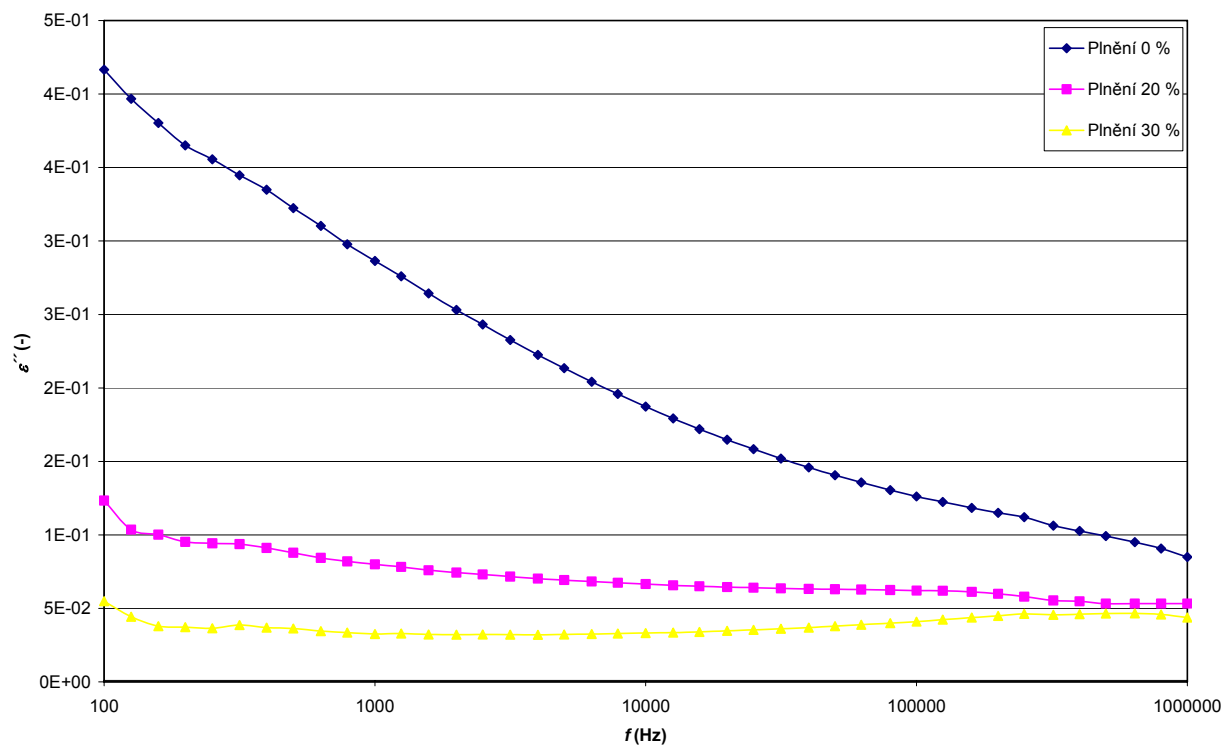
Obr. 3.5.6 Frekvenční závislost relativní permitivity ϵ' , při teplotě $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$



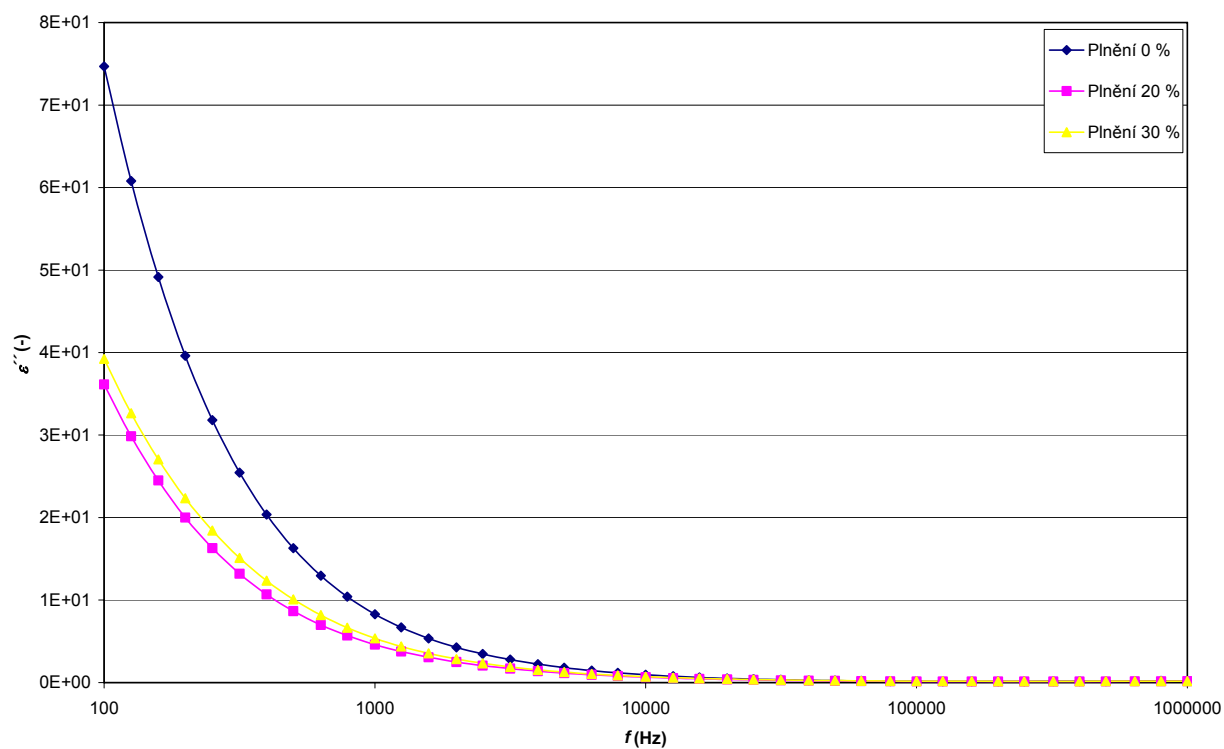
Obr. 3.5.7 Frekvenční závislost relativní permitivity ϵ' při plnění 0 %



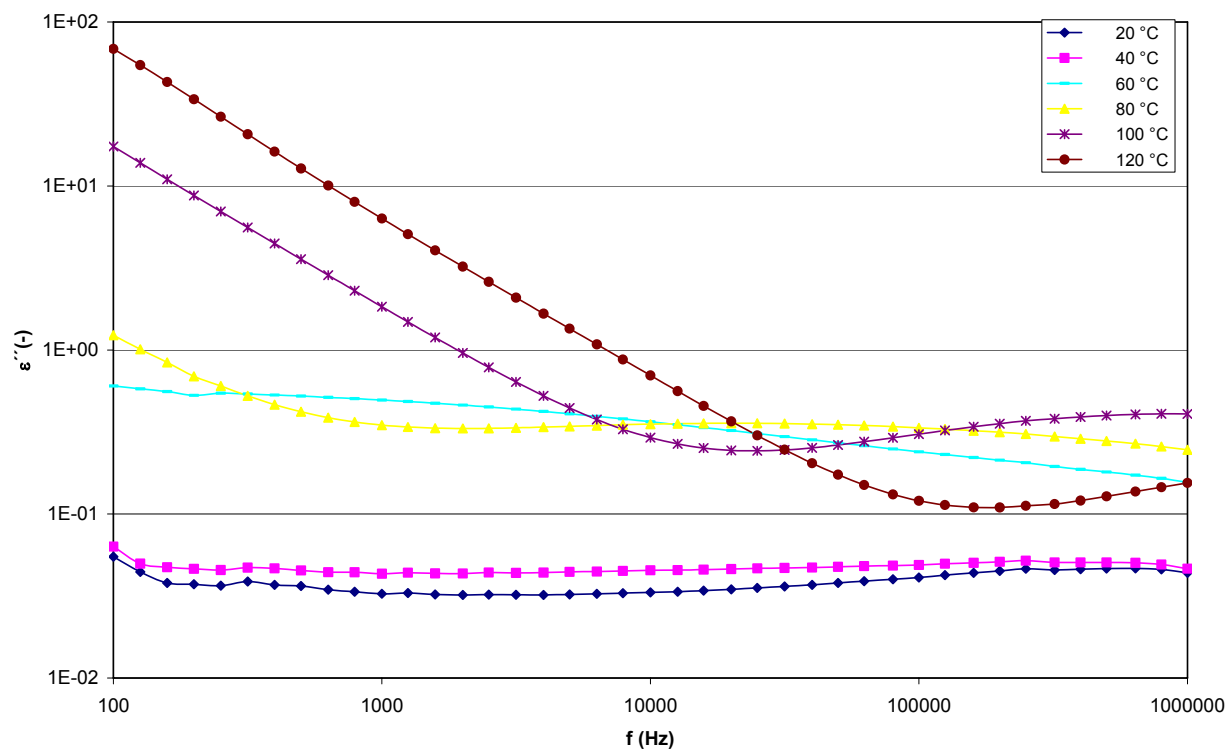
Obr. 3.5.8 Frekvenční závislost relativní permitivity ϵ' při plnění 30 %



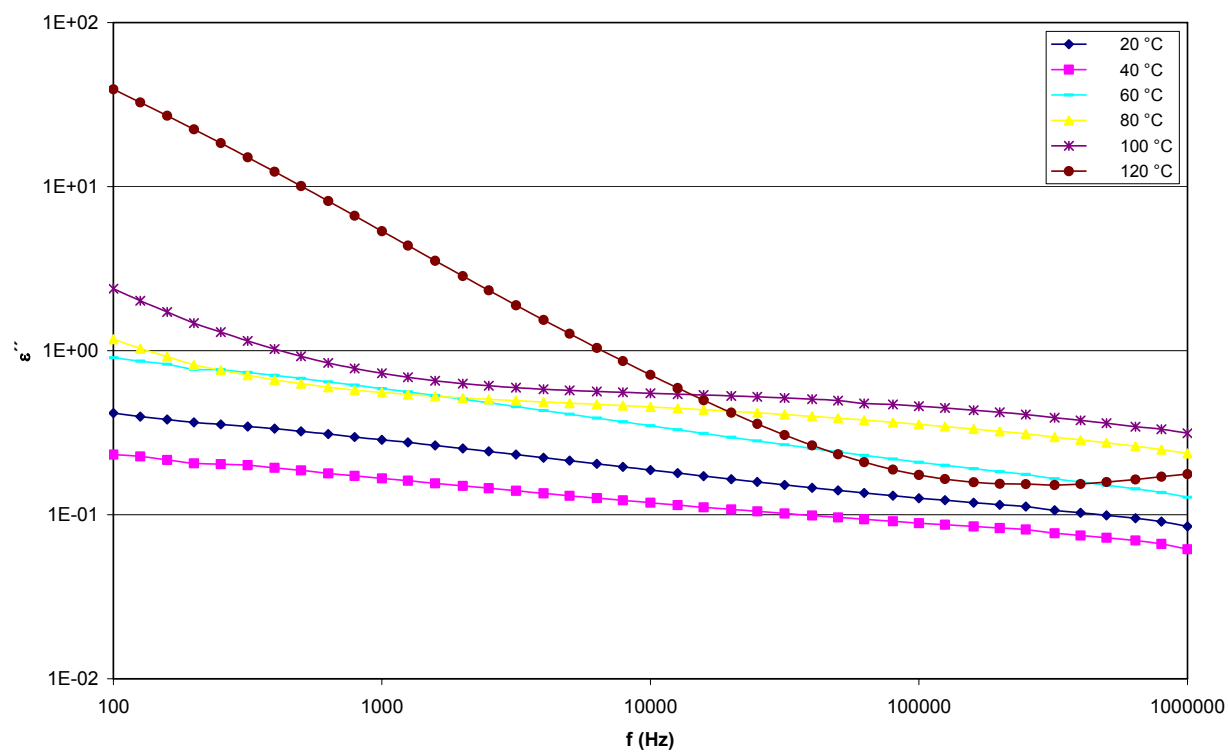
Obr. 3.5.9 Frekvenční závislost ztrátového čísla ε'' , teplotě $t = 40\text{ °C}$



Obr. 3.5.10 Frekvenční závislost ztrátového čísla ε'' , teplotě $t = 120\text{ °C}$



Obr. 3.5.11 Frekvenční závislost ztrátového čísla ε'' , při plnění 0 %



Obr. 3.5.12 Frekvenční závislost ztrátového čísla ε'' , při plnění 30 %

3.6 Naměřené a vypočtené hodnoty

3.6.1 Naměřené hodnoty vzorku s plněním 20 %

Hmotnost vzorku:	$m = 12,079 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
Permitivita slídy:	$\varepsilon_1' = 7$
Hustota slídy:	$\rho_{slida} = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Rozměr vzorku:	$S_{ef} = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}^2$
Tloušťka vzorku:	$h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Permitivita epoxidové hmoty:	$\varepsilon_2' = 4,71$
Průměr měřící elektrody:	$d_m = 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Šířka vzduchové mezery :	$c = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Permitivita vakua:	$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$

3.6.2 Vzorový výpočet objemových hodnot vzorku s plněním 20 %

Objem vzorku:

$$V = S_{ef} \cdot h = 0,01 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3}}$$

Hmotnostní podíl slídy:

$$m_{slida} = 0,2 \cdot m = 0,2 \cdot 12,079 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{2,415 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}}$$

Objem slídy ve vzorku:

$$V_{Slida} = \frac{m_{Slida}}{\rho_{Slida}} = \frac{2,415 \cdot 10^{-3}}{2700} = \underline{\underline{8,947 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3}}$$

Objemové procento slídy:

$$V_{\%Slida} = \frac{\frac{V_{Slida}}{100}}{\frac{V}{100}} = \frac{8,947 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{4,473 \text{ m}^3}}$$

Objem dispergovaných částic:

$$\nu_1 = \frac{V_{\%Slida}}{100} = \frac{4,473}{100} = \underline{\underline{0,04473}}$$

Objem částic matrice:

$$\nu_2 = 1 - \nu_1 = 1 - 0,04473 = \underline{\underline{0,95527}}$$

3.6.3 Směsné vztahy

Maxwellův přístup:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} &= 3\nu_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \rightarrow \varepsilon'_s = \left(3\nu_1 \varepsilon'_2 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \right) + \varepsilon'_2 = \\ &= 3 \cdot 0,04473 \cdot 4,71 \cdot \frac{7 - 4,71}{7 + 2 \cdot 4,71} + 4,71 = \underline{\underline{4,298}} \end{aligned}$$

Bottcherův přístup:

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_s} = 3\nu_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \rightarrow \varepsilon'_s \cdot (\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_s - 2\varepsilon'_2 - 3\nu_1 \varepsilon'_1 + 3\nu_2 \varepsilon'_2) - \varepsilon'_1 \varepsilon'_2 = 0$$

$$\varepsilon'_s \cdot (7 + 2\varepsilon'_s - 2 \cdot 4,71 - 3 \cdot 0,04473 \cdot 7 + 3 \cdot 0,95527 \cdot 4,71) - 7 \cdot 4,71 = 0$$

$$2 \cdot \varepsilon'^2_s - 10,137 \varepsilon'_s - 32,97 = 0$$

$$\varepsilon'_s = \underline{\underline{4,261}}$$

Lichteneckerův přístup:Pro $k = 1$:

$$\varepsilon'_s = \nu_1 \varepsilon'_1 + \nu_2 \varepsilon'_2 = 0,04473 \cdot 7 + 0,95527 \cdot 4,71 = \underline{\underline{4,212}}$$

Pro $k = -1$:

$$\frac{1}{\varepsilon'_s} = \nu_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + \nu_2 \frac{1}{\varepsilon'_2} = 0,04473 \cdot \frac{1}{7} + 0,95527 \cdot \frac{1}{4,71} = \underline{\underline{0,2096}} \rightarrow \varepsilon'_s = \underline{\underline{4,271}}$$

Logaritmický tvar:

$$\log \varepsilon'_s = \nu_1 \log \varepsilon'_1 + \nu_2 \log \varepsilon'_2 = 0,04473 \cdot \log 7 + 0,95527 \cdot \log 4,71 = 0,681$$

$$\varepsilon'_s = \underline{\underline{4,297}}$$

plnění	0%	20%	30%
f [Hz]	$\varepsilon' [-]$	$\varepsilon' [-]$	$\varepsilon' [-]$
100	3,68	4,21	5,18
1000	3,61	3,77	4,62
10000	3,56	3,83	4,33
100000	3,51	3,69	4,17
1000000	3,32	3,56	3,71

Tab. 3.6.3.1 Hodnoty relativní permitivity ε' při teplotě 40 °C , 20% plnění.

4 Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá experimentálním sledováním dielektrických spekter epoxidové hmoty s různým hmotnostním plněním mleté slídy.

Práce je členěna do dvou základních částí v rámci teoretické části jsou popsány základní elektrické vlastnosti elektroizolačních materiálů. Dále je pozornost zaměřena na materiály použité v diplomové práci tedy slídu a epoxidové pryskyřice.

V rámci experimentální části je popsána výroba vzorků, experimentální zařízení a je uveden popis samotného experimentu. Při experimentu byly proměřovány vzorky s hmotnostním plněním 0 %, 20 % a 30 % mleté slídy. Byly sledovány frekvenční závislosti reálné a imaginární části složek komplexní permitivity a ztrátového činitele. Naměřené výsledky jsou přehledně znázorněny v grafických závislostech pozorovaných dielektrických veličin. Naměřené hodnoty relativní permitivity byly srovnány vypočtenými podle směsných vztahů. Byla konstatována dobrá shoda naměřených a vypočtených hodnot.

Vzhledem k zjištěným průběhům kmitočtových závislostí je možno doporučit měření sledovaných veličin při kmitočtech nižších než byl rozsah přístroje použitého pro provedení experiment.

5 Použitá literatura

- [1] HASSDENTEUFEL J., DUBSKÝ J., RAPOŠ M., ŠANDERA J., Elektrotechnické materiály, Bratislava: Nakladatelství ALFA, 1971, ISBN 65-553-71
- [2] ČSN EN 60505, Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů, 2005
- [3] Ing. Josef Fexa, CSc., Ing. Karel Široký, CSc : Měření vlhkosti, Praha 1983, Nakladatelství technické literatury.
- [4] Artbauer J., Šedovič J., Adamec V. : Izolanty a izolácie. Bratislava: ALFA 1969. ISBN 63-060-69
- [5] HP4282A Precision LCR Meter – Operation Manual. Yokogawa / Hewlett Packard, LDT 1989.
- [6] JIRÁK J. a kolektiv, Materiály a technická dokumentace – část: Materiály v elektrotechnice, Brno: Vysoké učení technické, 2003, elektronická skripta
- [7] Václav Mentlík, Dielektrické prvky a systémy, 1. vydání, nakladatelství BEN, Praha 2006.