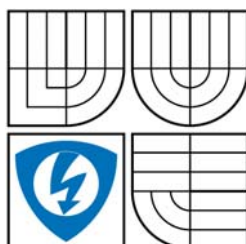


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

ANALÝZA VLASTNOSTÍ LAKOVÝCH KOMPOZITŮ V PRŮBĚHU NAVLHÁNÍ

ANALYSIS OF VARNISH COMPOSITES PROPERTIES IN THE COURSE OF
MOISTURE.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

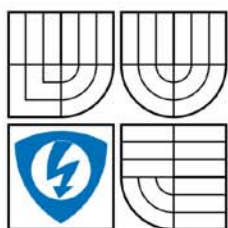
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr Novák

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Zdenka Rozsivalová

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Petr Novák
Ročník: 3

ID: 72779
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Analyza vlastností lakových kompozitů v průběhu navlhávání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte teorii kompozitních materiálů a směsných vztahů pro stanovení výsledných elektrických a mechanických vlastností. Seznamte se s metodami měření elektrických vlastností izolačních materiálů ve střídavém elektrickém poli.

Připravte sadu zkušebních vzorků s různým podílem mikromleté slídy. Prošetřete a vyhodnoťte vliv klimatických podmínek, zejména teploty a relativní vlhkosti, na složky komplexní permitivity složených lakových materiálů s ohledem na podíl plniva.

Podějte možnou matematickou interpretaci zjištěných výsledků aplikací směsných vztahů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 3.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Novák
Bytem: Dolní Vilémovice 141, 67552
Narozen/a (datum a místo): 22.12.1985, Třebíč

(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. Radimír Vrba, 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: Analýza vlastností lakových kompozitů v průběhu navlhávání

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zdenka Rozsivalová

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

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

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne: 3. 6. 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předložená bakalářská práce řeší problematiku přípravy zkušebních lakových vzorků plněných mikromletou slídou a sledování vlivu teploty a relativní vlhkosti prostředí na elektrické vlastnosti kompozitních materiálů metodou dielektrické relaxační spektroskopie. Kompozitní materiál je tvořen epoxidovým lakem TSA 220S, který je modifikován s různým hmotnostním procentem mikromleté slídy. Výsledkem práce jsou kmitočtové závislosti složek komplexní permitivity kompozitního materiálu při různých relativních vlhkostech a teplotách prostředí a jejich vyhodnocení.

Abstract:

The presented bachelor's work deals with preparation of micronized mica filled varnish samples. At the same time the temperature and relative humidity influence on the electrical properties of composite material by dielectric relaxation spectroscopy method are monitoring. The composite material consists of epoxide varnish TSA 220S, which is modified with different mass percentage of micronized mica. The results of this project are frequency dependencies of real and imaginary parts of complex permitivity with the environmental temperatures and humidities parameters of varnish components.

Klíčová slova:

Dielektrikum, lak TSA 220S, kompozity, navlhání, slída

Keywords:

Dielectric, varnish TSA 220S, composite, moisture, mica

Bibliografická citace díla:

NOVÁK, P. *Analýza vlastností lakových kompozitů v průběhu navlhávání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 3. 6. 2009

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Zdence Rozsivalové za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na bakalářskou práci. Dále děkuji Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za poskytnutou metodickou pomoc a odborné rady.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ	8
ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1.1 DIELEKTRIKA A JEJICH VLASTNOSTI	11
1.1.1 <i>Klasifikace molekul (podle způsobu uspořádání vázaných nábojů)</i>	11
1.2 DIELEKTRICKÁ POLARIZACE	12
1.2.1 <i>Pružné polarizace</i>	13
1.2.2 <i>Relaxační polarizace</i>	13
1.2.3 <i>Zvláštní polarizace</i>	14
1.3 ELEKTRICKÁ VODIVOST	14
1.4 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	15
1.5 KOMPOZITY	16
1.5.1 <i>Teorie složené soustavy</i>	17
1.5.2 <i>Permitivita složené soustavy</i>	17
1.6 ELEKTROIZOLAČNÍ LAKY A JEJICH DRUHY	19
1.6.1 <i>Klasifikace laků</i>	20
1.7 SLÍDA A JEJÍ DRUHY	20
1.8 NAVLHAVOST MATERIÁLŮ	21
1.9 VLHKOST PLYNŮ	21
1.10 TEPelné NAMÁHÁNÍ DIELEKTRIK	22
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	23
2.1 VÝROBA JEDNOTLIVÝCH LAKOVÝCH VZORKŮ	23
2.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY	24
2.3 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	27
2.4 VÝPOČET SLOŽEK KOMPLEXNÍ PERMITIVITY	28
2.4.1 <i>Tloušťky a hmotnosti lakových vzorků</i>	28
2.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	30
2.6 MATEMATICKÁ INTERPRETACE SMĚSNÝCH VZTAHŮ	35
3 ZÁVĚR	39
4 POUŽITÁ LITERATURA	40

Seznam symbolů

C	(F)	kapacita
C_0	(F)	geometrická kapacita
C_x	(F)	naměřená kapacita
c	(m)	šířka vzduchové mezery mezi stínicí a měřicí elektrodou tříelektrodového systému
d_m	(m)	průměr měřicí elektrody
E	(V m ⁻¹)	intenzita elektrického pole mezi elektrodami před vsunutím dielektrika
E'	(V m ⁻¹)	intenzita elektrického pole mezi elektrodami po vsunutí dielektrika
e	(C)	elementární náboj
f	(Hz)	kmitočet
h	(m)	tloušťka vzorku
J_p	(A m ⁻¹)	povrchová proudová hustota
$M_{\text{H}_2\text{O}}$	(kg)	hmotnost vodní páry
$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$	(kg)	hmotnost nasycené vodní páry
M_{vp}	(kg)	celková hmotnost vlhkého plynu
M_{sp}	(kg)	hmotnost suchého plynu
m	(kg)	hmotnost
n	(m ⁻³)	koncentrace nosičů elektrického náboje
\vec{P}	(C m ⁻²)	vektor polarizace
q	(%)	měrná vlhkost
s	(-)	směšovací poměr
$\text{tg } \delta$	(-)	ztrátový činitel

ρ	($\Omega \text{ m}$)	rezistivita
V	(m^3)	objem
v_1	(-)	objemový podíl elektroizolačního laku
v_2	(-)	objemový podíl slídy
ϑ	($^{\circ}\text{C}$)	teplota
γ	(S m^{-1})	konduktivita
γ_p	(S)	povrchová konduktivita
γ_v	(S m^{-1})	vnitřní konduktivita
δ	(rad)	ztrátový úhel
$\varepsilon' = \varepsilon_r$	(-)	relativní permitivita (reálná složka komplexní permitivity)
ε''	(-)	ztrátové číslo (imaginární složka komplexní permitivity)
ε_0	(F m^{-1})	permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$)
μ	($\text{m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	driftová pohyblivost
μ_i	(C m)	indukovaný dipólový moment
ϕ	(kg m^{-3})	absolutní vlhkost
ϕ_{nas}	(kg m^{-3})	absolutní vlhkost vzduchu při nasycení vodní párou
φ	(%)	relativní vlhkost

Úvod

Dielektrické materiály jsou v dnešní době hojně používány v nejrůznějších oblastech elektrotechniky. Ať už to jsou dielektrika do kondenzátorů nebo dielektrika pro vícevrstvé desky plošných spojů. Nároky na co nejlepší vlastnosti těchto materiálů rostou spolu se zvyšující se kvalitou výrobků. V dnešní době jsou navíc kladeny velké požadavky na co nejmenší zatěžování (znečišťování) životního prostředí. Vlastnosti materiálů jsou závislé na řadě vnějších činitelů. K významným činitelům ovlivňujícím vlastnosti dielektrik patří vlhkost a teplota, které výrazně mění některé dielektrické vlastnosti. Proto je potřeba zjišťovat (měřit) jejich vlastnosti a ty vyhodnotit pro následné zdokonalení výroby.

Úkolem této bakalářské práce je zkoumání technologie přípravy lakových vzorků s různými hmotnostními podíly mikromleté slídy a sledování, jak se množství přidané slídy projeví na vlastnostech vzorků.

Měření je prováděno nedestruktivní metodou dielektrické relaxační spektroskopie s využitím tříelektrodového měřicího systému. Vzorky lakových vzorků plněných mikromletou slídou jsou proměřovány při různých teplotách a úrovních relativní vlhkosti.

1 Teoretická část

1.1 Dielektrika a jejich vlastnosti

Dielektrikum je látka, ve které se po vložení do elektrického pole vytvoří vlastní elektrické pole. To znamená, že má schopnost se ve vnějším elektrickém poli polarizovat. Tento jev je využíván zejména u kondenzátorů, a to ve smyslu schopnosti akumulovat elektrickou energii.

Dielektrikum se skládá z atomů, molekul a iontů. Uvažujeme-li ideální dielektrikum (izolant), víme, že obsahuje jen vázané elektrické náboje a vyznačuje se velkou elektrickou pevností. Ve skutečnosti se však setkáme pouze s reálnými dielektriky (izolanty). Reálné dielektrikum obsahuje kromě vázaných elektrických nábojů i elektrické náboje volné, které jsou schopny se pohybovat. Jedná se tedy o látku s určitou, zpravidla velmi malou elektrickou vodivostí.

Často bývají zaměňovány pojmy „dielektrikum“ a „izolant“. Někdy se tyto pojmy považují za ekvivalentní, přitom se ale jedná o dvě skupiny materiálů, jejichž vlastnosti se mohou podstatně lišit. Pojem „dielektrikum“ chápeme ve vztahu s polarizovatelností částic a se schopností látky akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii (kondenzátor). „Izolant“ je materiál mající vlastnost zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potencíálem. Přes tyto rozdíly spolu pojmy dielektrikum a izolant souvisí. Každý izolant je dielektrikem, opak však obecně neplatí.

V závislosti na vnitřní struktuře dělíme dielektrika na polární a nepolární. Látka, obsahující ve svém objemu permanentní elementární dipólové momenty, i bez působení vnějšího elektrického pole, je polární. Výskyt dipólových momentů je dán strukturou látky. Strukturu látek tvoří molekuly, polárnost či nepolárnost molekuly souvisí s prostorovým uspořádáním, vztahy mezi jednotlivými atomy a typem vazby.

1.1.1 Klasifikace molekul (podle způsobu uspořádání vázaných nábojů)

Molekuly neutrální (nepolární) - jejich stavba je zcela symetrická, vázané elektrické náboje jsou rozloženy souměrně a jejich těžiště splývají. Při vložení do elektrického pole dojde k porušení symetrie - nepolární molekula vytvoří elektrický dipól a nabude indukovaný elektrický moment, jak je vidět na obr. 1.

Molekuly dipólové (polární) - mají nesymetrickou stavbu. I v nepřítomnosti elektrického pole mají stálý elektrický moment. Při působení elektrického pole se dipólové molekuly stáčí do směru tohoto pole, viz obr. 2.



Obr. 1: a) Molekuly dielektrika nepolárního (bez elektrického pole).
 b) Nepolární dielektrikum v elektrickém poli.



Obr. 2: a) Molekuly polárního dielektrika (mimo elektrické pole).
 b) Polární dielektrikum v elektrickém poli

1.2 Dielektrická polarizace

Vložení dielektrika do elektrického pole nastává jev, který se nazývá polarizace dielektrika. Jedná se o pružný pohyb více či méně vázaných nosičů elektrického náboje na malé, omezené vzdálenosti. Jsou-li ve struktuře dielektrika přítomny stálé dipólové molekuly, orientují se souhlasně se směrem pole a částečně mění svoji velikost [1].

Pokud E označuje intenzitu elektrického pole mezi elektrodami před vsunutím dielektrika mezi elektrody a jestliže označíme hodnotu intenzity elektrického pole mezi elektrodami po vsunutí dielektrika E' , lze vyjádřit relativní permitivitu dielektrika ϵ' podle vztahu [1].

$$\epsilon' = \frac{E}{E'} \quad (1)$$

Mírou polarizace v látce je relativní permitivita a vektor polarizace \vec{P} :

$$\vec{P} = \frac{\sum \mu_i}{V} \quad (2)$$

kde μ_i je indukovaný dipólový moment jednotkového objemu V .

V dielektrických látkách většinou probíhá současně několik druhů polarizací, přičemž silnější z nich překryjí mechanismy slabší.

1.2.1 Pružné polarizace

Jevy s rychlým průběhem, jsou též nazývány elastické polarizace. Vyznačují se extrémně krátkou dobou trvání a probíhají bez ztrát energie. Dochází při nich k pružnému posunutí vázaných nábojů z jejich rovnovážných poloh na malé vzdálenosti. Nejsou závislé na teplotě a na kmitočtu. Mezi pružné polarizace patří elektronová a iontová polarizace.

Polarizace elektronová – vyskytuje se u všech dielektrik. Je způsobena posunem elektronů z rovnovážných poloh na určitou malou vzdálenost, menší než jsou rozměry atomu nebo molekul. Tento jev je nezávislý na teplotě a probíhá beze ztrát. Doba ustavení rovnováhy je 10^{-16} až 10^{-14} s.

Polarizace iontová – vyskytuje se v iontových krystalech. Působením vnějšího elektrického pole dochází k pružnému posunutí iontů. Iontová polarizace je kmitočtově nezávislá a probíhá beze ztrát. Je ale závislá na teplotě.

1.2.2 Relaxační polarizace

Po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu. Po odpojení pole polarizace pomalu odeznívá. Tyto polarizace jsou značně závislé na teplotě a jsou vždy provázeny ztrátami v dielektriku. K ustálení těchto jevů je zapotřebí relativně dlouhá doba. Časový průběh doznívání je exponenciální, charakterizovaný časovou konstantou (relaxační dobou) τ . K pomalým relaxačním polarizacím řadíme polarizaci dipólovou a polarizaci iontovou – relaxační.

Polarizace dipólová – tento druh polarizace se vyskytuje v polárních látkách. Je silně závislá na teplotě a na kmitočtu. Provází ji ztráty energie v dielektriku. Doba ustavení rovnováhy se pohybuje od 10^{-12} do 10^{-8} s.

Polarizace iontová – relaxační – tato polarizace přichází v úvahu v iontových látkách s netěsným uložením iontů. Kromě závislosti na kmitočtu je značně závislá na teplotě a provází ji ztráty v dielektriku.

1.2.3 Zvláštní polarizace

Zvláštní polarizace dělíme na:

- polarizaci mezivrstvou (migrační)
- polarizaci samovolnou (spontánní)
- polarizaci trvalou (permanentní)
- polarizaci rezonanční.

Polarizace mezivrstvá (migrační) – ze zvláštních polarizací je nejčastější. Vyskytuje se u některých reálných dielektrik s makroskopickými nehomogenitami, polovodičovými příměsemi nebo nečistotami. Dochází při ní k migraci volných nebo slabě vázaných nábojů v látce. Ve srovnání s předešlými polarizačními mechanismy je migrační polarizace nejpomalejší, závislá na teplotě a je spojena se ztrátou energie.

Polarizace samovolná (spontánní) – vyskytuje se v látkách feroelektrických, vyznačujících se tzv. doménovou strukturou. Domény jsou makroskopické oblasti, v nichž jsou všechny částice plně – spontánně polarizovány v důsledku působení vnitřních výměnných sil. Polarizace je závislá na kmitočtu a na intenzitě elektrického pole. Výrazně závisí na teplotě.

Polarizace trvalá (permanentní) – vyskytuje se u některých polárních látek s malou elektrickou vodivostí, například elektretů. Elektrety jsou permanentně zpolarizovaná tělesa.

Polarizace rezonanční – probíhá u všech dielektrik, vzniká následkem rezonance vlastních (tepelných) kmitů částic s elektrickým nábojem s kmitů vnějšího elektrického pole. Projevuje se v optickém spektru kmitočtů.

1.3 Elektrická vodivost

Jedná se o fyzikální veličinu, která udává schopnost látky vést elektrický proud. Je založena na pohybu volných nebo slabě vázaných nábojů v elektrickém poli. Pro praktické účely používáme, pro hodnocení materiálů z hlediska jejich elektrické vodivosti, hodnoty měrného elektrického odporu – rezistivity ρ a měrné elektrické vodivosti – konduktivity γ . Vzájemný vztah obou zmíněných veličin je:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Elektrická vodivost je závislá na druhu nosičů elektrického náboje, velikosti náboje, driftové pohyblivosti a koncentraci nosičů náboje. Vnitřní konduktivita se vypočte ze vztahu:

$$\gamma_v = n e \mu \quad (4)$$

kde n je koncentrace nosičů elektrického náboje, e je elementární náboj nosiče elektrického náboje, μ je driftová pohyblivost.

Povrchová konduktivita je dána vztahem:

$$\gamma_p = \frac{J_p}{E} \quad (5)$$

kde J_p je povrchová proudová hustota a E je intenzita elektrického pole.

1.4 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty vyjadřují, kolik elektrické energie se díky dějům odehrávajícím se ve struktuře materiálu, po jeho zatížení elektrickým proudem, změní v jeho objemu za jednotku času v jinou, většinou nežádoucí tepelnou energii. Tím dochází k ohřevu dielektrika a mění se fázový úhel mezi napětím a proudem. U ideálního bezztrátového dielektrika v kondenzátoru, připojeném ke střídavému napětí, předbíhá proud napětí o fázový úhel $\varphi = 90^\circ$. V reálném dielektriku je tento fázový posun zmenšen o ztrátový úhel δ [3].

Velikost dielektrických ztrát vyjadřují:

- ztrátový úhel (δ)
- ztrátový činitel ($\text{tg } \delta$)
- ztrátové číslo ($\varepsilon'' = \varepsilon' \text{ tg } \delta$)
- měrné dielektrické ztráty (ztrátový výkon vztažený na jednotkový objem).

Z hlediska fyzikální podstaty dělíme dielektrické ztráty na:

- vodivostní
- polarizační
- ionizační.

Vodivostní ztráty – jsou podmíněny ohmickou vnitřní a povrchovou vodivostí dielektrika. Fyzikální podstatou je pohyb a srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi tvořícími strukturu látky. Dochází k nim při stejnosměrném i střídavém napětí a jejich důsledkem je degradace energie elektrického pole v Jouleovo teplo. Vodivostní ztráty se vyskytují u všech druhů dielektrik.

Polarizační ztráty – významně se podílejí na celkové výši ztrát. Jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. Tyto ztráty se prakticky nevyskytují u polarizace elektronové a iontové. Zato u dipólové a iontové – relaxační polarizace jsou tyto ztráty velké, značně závislé na kmitočtu a teplotě. Patří sem také ztráty, které se v dielektriku projeví až při kmitočtech světelného spektra, tzv. rezonanční ztráty. Při určitém kmitočtu jsou charakteristické silnou selektivností.

Ionizační ztráty – vyskytují se u plynů, tuhých a kapalných dielektrik s plynovými vměstkami. Podmínkou vzniku je překročení tzv. prahu ionizace daného plynu.

1.5 Kompozity

Kompozity jsou složené materiály, představující směšnou soustavu, tvořenou makroskopickými útvary dvou či více materiálových složek. Složeným materiálem lze nazvat soustavu, která vyhovuje těmto kritériím [2]:

- složená soustava musí být tvořena člověkem
- soustavu tvoří spojení dvou či více materiálů rozdílného chemického složení se zřetelnou hranicí mezi geometrickými útvary jednotlivých složek
- geometrické útvary jednotlivých složek jsou v soustavě spojeny v celém, příp. téměř celém objemu
- složená soustava musí mít vlastnosti odlišné od vlastností složek.

Ke složeným materiálům nepatří přírodní materiály, jako je např. dřevo, i když mají výrazně charakter složené soustavy. Použitím složených materiálů místo jednoduchých se zpravidla sleduje některé z těchto hledisek [2]:

- dosažení výhodnějších mechanických vlastností
- dosažení vyšší tvarové stability
- dosažení výhodnějších tepelných vlastností
- omezení hořlavosti
- zmenšení nasákavosti
- zmenšení smrštění a zamezení vzniku dutin a prasklin.

Vlastnosti složených materiálů jsou závislé na vlastnostech materiálů složek a jsou výrazně ovlivňovány množstvím jednotlivých složek v soustavě, geometrickým tvarem částic složek, jejich orientací, uspořádáním a rozložením v soustavě. Velký vliv na mechanické vlastnosti mají chemické a fyzikální pochody na hranicích složek, ke kterým může docházet při výrobě složeného materiálu nebo při jeho využívání.

1.5.1 Teorie složené soustavy

Při návrhu a použití kompozitů je vhodné znát nejen materiálové vlastnosti soustavy, ale i vztah těchto vlastností k příslušným vlastnostem složek. Tuto problematiku řeší teorie složených (směsných) soustav, jejímž hlavním úkolem je vyhledání přiměřeného směsného vztahu.

Máme-li mnohosložkovou soustavu složenou z materiálů o vlastnostech X_1, X_2, \dots, X_n a poměrných objemových dílech složek v soustavě v_1, v_2, \dots, v_n je obecně výsledná vlastnost X_s určena funkcí podle vztahu (6):

$$X_s = F(X_1, X_2, \dots, X_n, v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (6)$$

Přičemž platí:

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (7)$$

V konkrétních případech bývá funkční závislost (6) složitější, jelikož zahrnuje i vliv tzv. geometrie složené (směsné) soustavy. Výjimku tvoří případy jednoduchých složených soustav, tvořených např. paralelně nebo sériově řazenými vrstvami několika různých materiálů.

1.5.2 Permitivita složené soustavy

Nejčastěji řešené složené soustavy jsou soustavy dvousložkové. V minulosti byla odvozena a uvedena řada směsných vztahů pro výpočet permitivity. Většina těchto vztahů si je však podobná a od obecného tvaru směsného vztahu se liší pouze mírou použité aproximace.

Většina směsných vztahů popisuje maticí soustavy s maticím prostředím o permitivitě ε'_2 a dispergovanými částicemi kulového tvaru o permitivitě ε'_1 . Při odvození zevšeobecněného vztahu se uvažuje, že každá dispergovaná částice je obklopena prostředím o efektivní permitivitě $\varepsilon'_{\text{ef}} = \langle \varepsilon'_2 ; \varepsilon'_1 \rangle$.

Vhodné je pracovat se středními prostorovými hodnotami elektrické indukce a intenzity elektrického pole. Vychází-li se z těchto středních hodnot, lze pro sledovaný případ částic

kulového tvaru vyjádřit permitivitu soustavy ε'_s výrazem:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon'_2 \left[1 + v_1 \left(\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} - 1 \right) \frac{3\varepsilon'_{ef}}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_{ef}} \right] \quad (8)$$

Vztah (8) lze považovat za všeobecný směsný vztah a je ho možné převést do tvaru :

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_{ef}}{\varepsilon'_2} \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_{ef}} \quad (9)$$

Výpočet permitivity ε'_s dosazením $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_2$ nebo $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_s$ do rovnice (9) je důsledkem aproximativního přístupu výpočtu a neodpovídá v obecném případě skutečnosti.

V Maxwellově přístupu je použita aproximace $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_2$. Ten odvodil dodnes používaný směsný vztah pro případ matriční soustavy s nízkou koncentrací dispergovaných částic tvaru stejných koulí. Maxwellův směsný vztah:

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \quad (10)$$

Z aproximace $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_s$ vychází Böttcherův směsný vztah pro soustavu s kulovými částicemi:

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_s} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_s} \quad (11)$$

V technické praxi se nejčastěji z empirických vztahů používají Lichteneckerovy směsné vztahy. Lichteneckerův mocninový vztah:

$$\varepsilon_s'^k = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i'^k \quad (12)$$

kteřý nabývá pro dvousložkové soustavy tvaru:

$$\varepsilon_s'^k = v_1 \varepsilon_1'^k + v_2 \varepsilon_2'^k \quad (13)$$

Vztah obsahuje empirický parametr k , který je závislý na tvaru a orientaci částic složené soustavy. Parametr k může obecně nabývat jakékoliv hodnoty v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$. Pro krajní hodnoty k odpovídá rovnice (13) vztahům (14) a (15):

$$\varepsilon'_s = v_1 \varepsilon'_1 + v_2 \varepsilon'_2 \quad (14)$$

$$\frac{1}{\varepsilon'_s} = v_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + v_2 \frac{1}{\varepsilon'_2} \quad (15)$$

kteře popisují permitivitu soustavy složené ze dvou paralelně nebo sériově řazených vrstev. Jestliže nabývá k hodnoty $k \rightarrow 0$, přechází rovnice v tzv. Lichteneckerův logaritmický vztah:

$$\log \varepsilon'_s = v_1 \log \varepsilon'_1 + v_2 \log \varepsilon'_2 \quad (16)$$

kteřý dobře popisuje složené soustavy statistického i matričního typu s libovolnou hodnotou poměrného objemového dílu všech složek soustavy s částicemi libovolného či neurčitého tvaru při chaotickém uspořádání složek a je tvarově jednoduchý. Čím menší bude poměr permitivit obou složek, tím přesnější bude popis dvousložkové složené soustavy daný vztahem (16). Při odvozování svých vztahů uvažoval Lichtenecker dvě složky o nejvyšším poměru $\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} = 4$ [2].

1.6 Elektroizolační laky a jejich druhy

Úkolem elektroizolačních laků je zpravidla vyplnění všech volných míst v izolaci elektrotechnických zařízení při jejich impregnaci vytvořením suchého lakového povlaku (filmu).

Jedná se v podstatě o koloidní disperze tuhých i kapalných látek v rozpouštědlech a ředidlech. Rozpouštědla a ředidla jsou důležitá jen při přípravě laků, jinak představují jen jejich neaktivní složky. Po odstranění rozpouštědel a ředidel vytvářejí tzv. filmtvorné složky lakový film. Obsah filmtvorných složek v lacích určuje jejich sušina.

Velmi důležitou vlastností elektroizolačních laků je jejich viskozita. Ta závisí na obsahu filmtvorných složek, molekulové hmotnosti, struktuře, povaze molekul a také na obsahu rozpouštědel a ředidel.

Aby mohlo dojít k přeměně tekutých laků v tuhé, musí dojít k odstranění rozpouštědel a ředidel. Poté, při schnutí a vypalování laků, mění filmtvorné složky laku svoji strukturu a pochody polymeračními, polykondenzačními, polyadičními a oxidací se mění v konečnou makromolekulární strukturu. Strukturální změny vytvářejí na povrchu pevnou pružnou vrstvu, která má dobré elektroizolační vlastnosti.

1.6.1 Klasifikace laků

Elektroizolační laky můžeme dělit podle použití na:

- impregnační laky (napouštěcí laky)
- laky na dráty
- laky na tkaniny, izolační trubičky a papír
- lepicí laky
- povrchové laky.

Podle chemické povahy filmotvorných složek se dělí na:

- laky na bázi přírodních pryskyřic (lihové laky)
- laky na bázi vysychavých olejů (olejové laky)
- laky na bázi syntetických pryskyřic a polymerů (čisté a modifikované syntetické laky).

1.7 Slída a její druhy

Slída je pro své výborné vlastnosti dané její strukturou, v níž její silné kovalentní vazby kyslíku a křemíku ve vrstvách oxidu křemičitého zajišťují stabilitu, hlavní složkou izolačních materiálů. Slída je přírodní materiál vyskytující se v přírodě v mnoha formách. Mezi její charakteristické vlastnosti patří dobrá štípatelnost, pružnost, nehořlavost, v tenkých lístcích ohebnost a chemická odolnost. Pro elektroizolační účely jsou nejpoužívanějšími dva druhy slídy – muskovit a flogopit [3].

Muskovit – je to tzv. draselná slída – kyselý křemičitan hlinitodraselný. Je bezbarvý, světle hnědý až světle zelený podle příměsí. Je odolný do teploty 600 °C.

Flogopit – je to tzv. hořečnatá slída – kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý. Může být tmavý, jantarový, zlatý až šedý – opět podle příměsí. Používá se do teploty 900 °C.

Obchodní druhy slídy:

- bloková (tabulková) slída
- kalibrovaná slída
- štípaná slída
- mletá slída
- mikromletá slída.

Klasifikace slídových výrobků:

- výrobky z čisté slídy
- slídové izolanty vrstvené s pojivem
- slídové izolanty na podkladě upravené slídy
- mletá a mikromletá slída.

1.8 Navlhavost materiálů

Navlhavost (hydroskopičnost) je schopnost látky přijímat vlhkost z prostředí (atmosféry). Jde o dlouhodobý proces, při kterém se v látce, uložené v prostředí o dané (stálé) teplotě a stálé relativní vlhkosti, zvyšuje postupně počáteční obsah vlhkosti v jednotkovém objemu a asymptoticky se blíží k rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá relativní vlhkosti prostředí. Rozlišujeme dva základní fyzikální děje, a to adsorpci a absorpci molekul vody [4].

Adsorpce se uplatňuje hlavně na povrchu dané látky, na kterém se molekuly vody usazují. Pokud tyto molekuly vody pronikají i do materiálu, jedná se o absorpci.

1.9 Vlhkost plynů

Vlhkým plynem je myšlen plyn, v němž je přítomna vodní pára zaujímající objem V . Odstraněním vodní páry získáme plyn suchý. Rozlišujeme několik základních pojmů: absolutní vlhkost, měrná vlhkost a směšovací poměr [6].

Absolutní vlhkost – nebo-li hustota vodní páry, se značí ϕ . Je to celkové množství vodní páry v jednotkovém objemu zkoumaného vlhkého plynu:

$$\phi = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} \quad (17)$$

kde $M_{\text{H}_2\text{O}}$ je celková hmotnost vodní páry obsažené v plynu, V je objem zkoumaného vlhkého plynu.

Měrná vlhkost – udává podíl hmotnosti vodivé páry k celkové hmotnosti vlhkého plynu:

$$q = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{vp}}} \quad (18)$$

kde $M_{\text{H}_2\text{O}}$ je celková hmotnost vodní páry obsažené v plynu a M_{vp} je celková hmotnost vlhkého plynu.

Směšovací poměr – značí se s . Je to podíl hmotnosti vodní páry k celkové hmotnosti suchého plynu:

$$s = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{sp}}} \quad (19)$$

kde $M_{\text{H}_2\text{O}}$ je celková hmotnost vodní páry obsažené v plynu a M_{sp} je celková hmotnost suchého plynu.

Relativní vlhkost φ – (často značená RH) udává poměr hmotnosti vodní páry obsažené v plynu ke hmotnosti vodní páry, kterou by obsahoval stejný objem vzduchu, kdyby byl při stejné teplotě vodními parami nasycen:

$$\varphi = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}} \quad (20)$$

kde $M_{\text{H}_2\text{O}}$ je celková hmotnost vodní páry obsažené v plynu a $M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$ je hmotnost vodní páry, kterou byl objem vzduchu nasycen.

Pomocí vztahu (17) lze relativní vlhkost též vyjádřit jako podíl skutečné absolutní vlhkosti plynu a absolutní vlhkosti téhož plynu za stejné teploty, pokud by byl vodní parou nasycen:

$$\varphi = \frac{\phi}{\phi_{\text{nas}}} \quad (21)$$

kde ϕ je skutečná absolutní vlhkost plynu a ϕ_{nas} je absolutní vlhkost vzduchu při nasycení vodní párou.

1.10 Tepelné namáhání dielektrik

Pro elektrické zařízení jsou rozhodující podmínky, v nichž pracuje při provozu. Významným faktorem je provozní teplota. Teplota je u elektrických zařízení převládajícím činitelem způsobujícím stárnutí dielektrických materiálů.

Proto je důležitým aspektem při návrhu elektrického zařízení jeho tepelná odolnost. Tepelné namáhání dielektrik je způsobeno zejména vysokou teplotou prostředí, dielektrickými ztrátami a chemickými změnami v dielektriku způsobenými zvýšenou teplotou. Dlouhodobě zvýšená pracovní teplota dielektrika přispívá k jemu rychlejšímu stárnutí a trvalému zhoršení jeho základních vlastností.

Obecně tepelné vlastnosti lakových kompozitních materiálů závisí na typu použité pryskyřice. Kompozitní materiály vykazují dobré tepelné a elektrické charakteristiky při zachování elektromagnetické propustnosti.

2 Experimentální část

Po studiu fyziky dielektrik, procesu navlhavosti materiálů a problematiky přípravy lakových vzorků s různým podílem slídy jako plniva byla započata výroba jednotlivých vzorků.

Vzorků bylo postupně připraveno několik sad s využitím různých typů forem. Bylo vyzkoušeno několik druhů elektroizolačních laků, k plnění byla použita mletá slída různé hrubosti (zrnitosti) v různém procentuálním zastoupení. Při vytvrzování v laboratorním horkovzdušném sterilizátoru STERICELL 55, s nucenou cirkulací vzduchu, však u většiny vzorků docházelo, buď k jejich popraskání, vytvoření vzduchových vměstek uvnitř vzorku (vzduchových bublinek), nebo k oběma problémům současně. Způsob přípravy zkušebních vzorků je popsán v další kapitole.

2.1 Výroba jednotlivých lakových vzorků

Po výpočtu objemu použitých forem (polytetrafluoretylenové, lukoprenové), hmotnosti použitého elektroizolačního laku a hmotnostního podílu slídy byl v kádince na laboratorní váze navážen daný podíl mleté slídy a elektroizolačního laku. Lak bylo nutné důkladně promíchat, aby v něm nevznikly shluky (hrudky) slídy. Do forem, důkladně vyčištěných technickým lihem, byl vpraven pomocí injekční stříkačky daný objem lakové směsi. Vzduchové vměstky, které se po vylití do formy objevily na povrchu vzorku, byly odstraněny preparační jehlou.

Po odstranění vzduchových vměstek a dokonalém rozlití byly vzorky vloženy do laboratorního horkovzdušného sterilizátoru, kde došlo k vytvrzení lakové směsi, vzorky se vypalovaly po stanovenou dobu při teplotě dané materiálovým listem.

První sada vzorků obsahovala impregnační pryskyřici VUKI NH91 LV s výrobcem udanými hodnotami hustoty $1130 - 1140 \text{ kg m}^{-3}$ a dobou vytvrzení 3 až 5 hodin při teplotě $135 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$. Šest vzorků, každý s 2% podílem slídy jako plniva, vytvořilo tři dvojice s různým typem slídy. Byly použity formy z polytetrafluoretylénu (PTFE) s objemem kolmého rotačního kužele, seřazeny do dvojic podle velikosti jejich objemu, a to tak, že dvojici tvořily formy se stejným objemem rotačního kužele. Do jedné dvojice forem byl odléván lak s dvouprocentním podílem mleté slídy P 66. Pro další dvojici se použila slída s označením 60.030 a pro poslední byla použita slída s označením Mica – M. Vzorky ve formách popraskaly a současně se v nich vytvořily vzduchové vměstky.

Druhá sada neobsahovala žádný podíl slídy jako plniva. Byly vyrobeny dva vzorky z dvou polyesterových pryskyřic DOLPHON různých typů. Použity byly formy z polytetrafluoretylénu (PTFE). Do jedné formy byla nalita polyesterová pryskyřice DOLPHON XL 2102, tepelné třídy H. Jedná se o jednosložkovou pryskyřici se 100 %

pevných částic. Doba pro vypalování je určena výrobcem po dobu 2,5 hodiny při teplotě 150 °C nebo 2 hodiny při teplotě 160 °C, či 75 minut při 170 °C. Do druhé formy byla nalita jednosložková polyesterová pryskyřice DOLPHON CC 1105. Měrná hmotnost je 1160 - 1200 g cm⁻³. Vytvrzovací doby jsou při teplotě 120 °C 6 – 8 hodin, při 135 °C 3 – 4 hodiny a při 150 °C 2 – 3 hodiny. Doba vytvrzení pro obě pryskyřice byla zvolena 2 hodiny při 160 °C. Po vytvrzení vzorek z polyesterové pryskyřice DOLPHON XL 2102 praskl. Vzorek z druhé pryskyřice popraskal více a obsahoval vzduchové vměstky.

V další sadě byly vyrobeny vzorky s 5% a 10% podílem mleté slídy P66 byla použita polyesterová pryskyřice DOLPHON XL 2102. Polytetrafluoretylenové formy byly očištěny a předehřáty na teplotu 60 °C po dobu 25 minut. Po odlití lakových vzorků do forem a jejich vypálení se oba dva vzorky prohnuly.

Ve čtvrté sadě byly opět použity polyesterové pryskyřice DOLPHON XL 2102 a CC 1105. Vzorky byly odlévány do dvou lukoprenových forem z důvodů jejich lepší tepelné roztažnosti a tím lepší schopnosti zabránit praskání vzorků. Do lukoprenové formy s menším průměrem byla použita polyesterová pryskyřice DOLPHON XL 2102 s 5% podílem mleté slídy P 66. Tato pryskyřice se stejným podílem slídy byla nanesena také na kovovou destičku. Pro lukoprenovou formu s větším průměrem bylo použito polyesterové pryskyřice DOLPHON CC 1105 s 10% podílem mleté slídy P 66. Po očištění a předehřátí forem v peci na teplotu 50 °C byla do nich nalita pryskyřice s daným podílem slídy a vzorky vytvrzeny po dobu dvou hodin při teplotě 160 °C. Vzorek s 5% podílem slídy praskl, vzorek s 10% podílem popraskal více a měl vzduchové vměstky.

Na poslední sadu vzorků bylo použito polyesterové pryskyřice DOLPHON XL 2102 tepelné třídy H. Vyrobeny byly dva vzorky s 10% podílem slídy a jeden s 15% podílem mleté slídy 60.030. Použity byly opět formy z polytetrafluoretylénu (PTFE) pro lakové vzorky s podílem slídy 10 % a 15 %. Lak s 10% podílem slídy byl ještě rozlit do zkušební formy od specializované firmy. Doba vytvrzení byla zvolena 2,5 hod. při 150 °C. Po vytvrzení vzorek s 10% podílem slídy praskal a vzorek s 15% podílem slídy byl prohnut směrem nahoru, nebyl však prasklý. Speciální forma se roztekla. Z toho důvodu byl vzorek v ní nepoužitelný.

2.2 Zkušební vzorky

Po neúspěších s různými druhy laků a slíd byly pro měření použity experimentální vzorky připravené z elektroizolačního laku EPOXYLITE TSA 220S a mikromleté slídy firmy Merck s označením 1.04750.1000. Jedná se o čtyři sady po devíti vzorcích, každá sada se liší obsahem slídy jako plniva. První sada je vyrobena pouze z čistého laku bez podílu slídy, druhá sada vorků obsahovala 4 %, třetí sada 8 % a čtvrtá sada 12 % podíl mikromleté slídy.

Na vzorcích byly sledovány kmitočtové závislosti složek komplexní permitivity, relativní permitivity a ztrátového čísla, při různých teplotách a relativních vlhkostech prostředí.

Charakteristika epoxidové pryskyřice

Zkušební vzorky jsou vyrobeny z vysoce kvalitního epoxidového impregnačního laku EPOXYLITE TSA 220S. Jedná se o jednosložkovou čirou epoxidovou pryskyřici jantarové barvy. Vyznačuje se výchozí viskozitou 5000 mPa s při 25 °C a po zahřátí strmým poklesem viskozity. Při 50 °C vykazuje hodnotu 500 mPa s. Lak je vytvrzován při 165 °C. Doba gelovatění, udávaná výrobcem, je 6 min., po 12 hodinách je lak zcela vytvrzen.

Tab. 1: Vlastnosti tvrzené pryskyřice [11].

Tvrдость D podle Shorea	(DIN 53505)	92 (25 °C)
Tepelná třída	(ASTM D1207/20000hod.)	220 °C
Teplota zesklnění	(IEC 1006)	150 °C
Pevnost v tahu	(ISO 527)	110 N mm ⁻²
Poměrné prodloužení při přetržení	(ISO 527)	2,50%
Součinitel tepelné roztažnosti	(DIN 53752)	50.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Tepelná vodivost	(ISO 8894-1)	0,21 W m ⁻¹ K ⁻¹
Zápalnost	(UL 94)	----
Absorpce vody	(ISO 62)	0,12% (23 °C)
Dielektrická pevnost	(IEC 243-1)	260 k V cm ⁻¹
Dielektrická konstanta	(IEC 250)	3,6 při 20 °C
Ztrátový činitel	(IEC 250)	0,003 při 20 °C
Měrný (objemový) odpor	(IEC 93)	1013 Ω cm

Charakteristika slídy

Vzorky obsahují podíl mikromleté slídy firmy Merck s označením 1.04750.1000. Jedná se o nerostnou surovinu vyrobenou mletím slídy nebo slídových odpadů na částice menší než 15 μm.

Příprava vzorků před měřením

Vlastnosti vzorků byly zkoumány při postupném navlhání vzorků na relativní vlhkosti 0 %, 33 %, 55 % a 75 %. Pro každou hodnotu relativní vlhkosti byly změřeny vlastnosti vzorků pro teploty 20 °C, 30 °C, 40 °C a 50 °C. Nulové hodnoty relativní vlhkosti se docílily v exsikátoru s molekulovým sítem. U vyšších hodnot relativních vlhkostí bylo využito nasycených roztoků příslušné soli v destilované vodě. Tyto soli v nasyceném roztoku s destilovanou vodou zajišťovaly požadovanou hodnotu relativní vlhkosti v exsikátoru. Po proměření vlastností vysušených vzorků, byly vzorky vloženy do exsikátoru s nasyceným roztokem MgCl₂ s hodnotou relativní vlhkosti 33 %. Další exsikátory obsahovaly nasycený roztok Mg(NO₃)₂ o relativní vlhkosti 55 %, nasycený roztok NaCl, vytvářející relativní vlhkost 75%.

Před každým měřením byly vzorky vloženy do připraveného exsikátoru, ve kterém byla udržována a kontrolována požadovaná hodnota relativní vlhkosti. Hodnota správné relativní vlhkosti byla kontrolována digitálním vlhkoměrem v průběhu navlhání vzorků. Vzorky byly do exsikátoru vloženy vždy nejméně 7 dní před samotným měřením, a to proto, aby se docílilo jejich dokonalého navlhnutí na požadovanou hodnotu relativní vlhkosti.

Při měření vlastností vzorků, při nulové relativní vlhkosti, byl vzorek přímo z exsikátoru s molekulovým sítem vkládán mezi elektrody, po změření byly vzorky vráceny hned nazpět, aby nedocházelo k jejich navlhání z okolního prostředí.

Pro měření vlastností vzorků o vyšších relativních vlhkostech (33 %, 55 % a 75 %) a současně za vyšších teplot (20 °C, 30 °C, 40 °C a 50 °C) byly vzorky vkládány do předem připravené klimatické komory CLIMACELL 111 s nastavenými parametry. Klimatická komora byla před každým měřením nastavena na požadovanou hodnotu relativní vlhkosti a teploty. Vzorky byly do klimatické komory vkládány z exsikátoru nejdříve po 45 minutách od jejího nastavení, aby se zaručilo dostatečně ustálených hodnot relativní vlhkosti pro danou teplotu v komoře. Po vložení vzorků do komory se čekalo nejméně dalších 45 minut kvůli dokonalému prohřátí měřených vzorků na požadovanou teplotu. Poté se mohlo začít s vlastním měřením kapacity a ztrátového činitele v kmitočtové závislosti pro jednotlivé vzorky. Naměřené hodnoty byly dále zpracovány do kmitočtových závislostí relativní permitivity a ztrátového činitele.

2.3 Měřicí zařízení

Základní měření probíhala na přesném RLC metru Agilent E4980A, který je na obr. 3, v kmitočtové oblasti 20 Hz až 10 MHz. Pro grafické vyhodnocení byla použita oblast 100 Hz až 10 MHz, jelikož nižší kmitočty byly zatíženy velkou chybou.



Obr. 3: RLC metr Agilent E4980A [7].

K RLC metru Agilent E4980A byl připojen tříelektrový rovinný systém Agilent 16451B, viz obr. 4. Měřicí systém se skládá ze tří elektrod měřicí, napěťové a ochranné (stínící). Při vlastním měření jsou vzorky vkládány přímo mezi elektrody a RLC metr proměřuje jejich kapacity a ztrátové činitele. Pro měření v závislosti na kmitočtu při vyšších hodnotách relativní vlhkosti a různých teplotách byl elektrodový systém vkládán do klimatické komory CLIMACELL 111. Popsaný systém vyhovuje pro teplotní rozsah $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. S ohledem na to bylo měření omezeno na teplotní rozsah $20 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 4: Tříelektrový systém Agilent 16451B [8].

2.4 Výpočet složek komplexní permitivity

RLC metr Agilent E4980A je propojen přímo s osobním počítačem a pomocí softwaru VEE PRO8 umožňuje zaznamenávat naměřené hodnoty kapacity a ztrátového činitele v programu MS Excel. Tím jsou velmi zjednodušena všechna měření a výpočty složek komplexní permitivity.

Geometrická kapacita vzorku se určí ze vztahu

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{\pi (d_m + c)^2}{4 h} \quad (22)$$

kde ε_0 je permitivita vakua, d_m je průměr měřicí elektrody, c je vzdálenost mezi měřicí a stínící elektrodou, h je tloušťka vzorku, viz tab. 2.

Pro výpočet relativní permitivity ε' byl použit vztah (23), udávající závislost naměřené geometrické kapacity:

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0} \quad (23)$$

kde C_x je hodnota naměřené kapacity a C_0 je geometrická kapacita elektrodového systému.

Ztrátové číslo (imaginární část komplexní permitivity) se vypočte pomocí vztahu (24), udávajícího závislost mezi relativní permitivitou a ztrátovým činitelem:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \quad (24)$$

kde ε' je relativní permitivita a $\operatorname{tg} \delta$ je ztrátový činitel.

2.4.1 Tloušťky a hmotnosti lakových vzorků

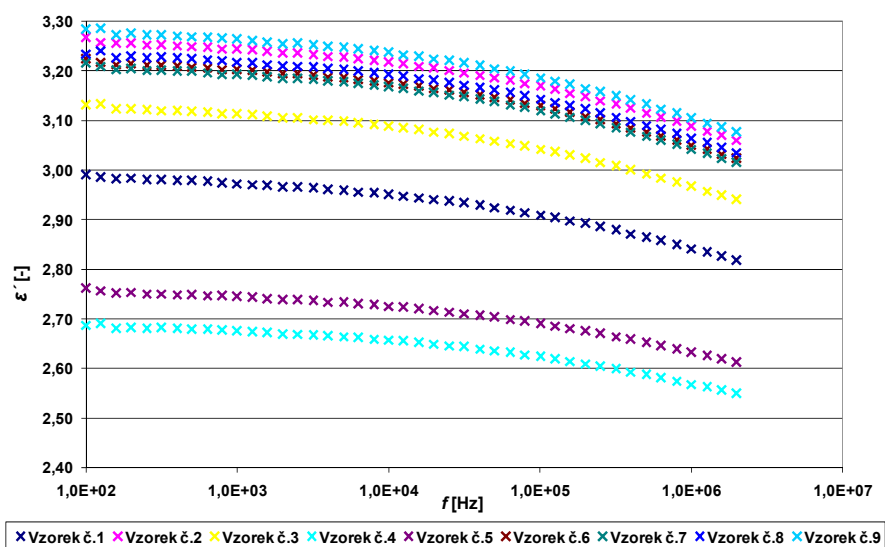
Tloušťky lakových vzorků, uvedené v tab. 2, jsou střední hodnotou sedmi náhodně naměřených hodnot na ploše vzorku. K měření tloušťky bylo použito digitálního mikrometru firmy Schut (Schut Geometrical Metrology) s označením IP 54. Pro zjištění hmotnosti lakových vzorků bylo použito elektronické laboratorní váhy WPS 360/C/2. Ta je určena pro přesné a rychlé vážení s rozlišovací schopností 1mg.

Tab. 2: Přehled tloušťek a hmotností jednotlivých vzorků.

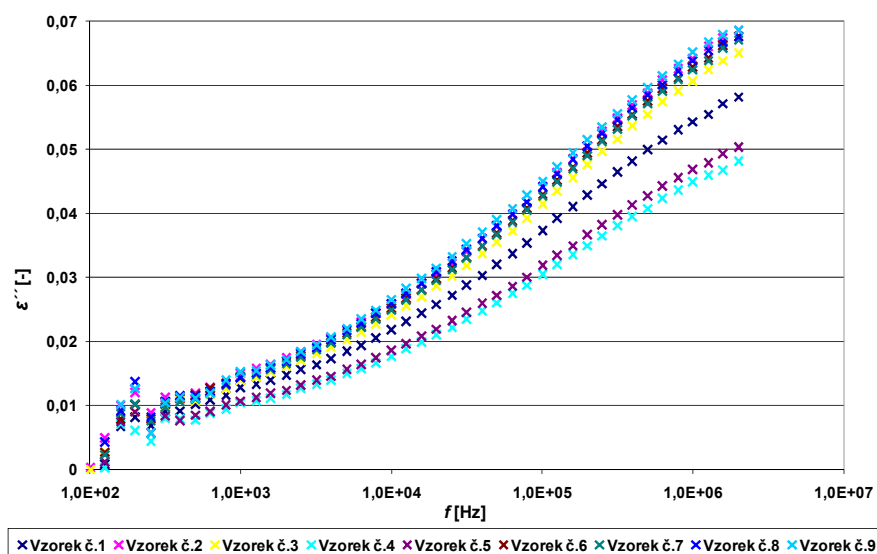
vzorek č.	plnění [%]	tloušťka h [mm]	hmotnost m [g]
1	0	2,465	9,047
2		2,263	7,780
3		2,211	8,275
4		2,762	10,297
5		2,627	9,378
6		2,671	9,857
7		2,759	10,068
8		3,096	13,517
9		4,477	15,315
1	4	2,754	9,799
2		2,234	8,367
3		2,440	8,203
4		2,939	11,013
5		2,812	10,679
6		3,117	11,658
7		3,233	11,891
8		4,318	15,028
9		5,382	18,653
1	8	2,958	11,329
2		2,378	8,203
3		2,260	8,841
4		2,992	11,226
5		2,992	11,199
6		3,005	11,361
7		2,973	11,341
8		5,083	17,900
9		5,312	18,728
1	12	3,011	11,607
2		2,289	8,928
3		2,412	8,653
4		3,109	11,945
5		3,489	13,320
6		3,087	12,052
7		3,224	12,490
8		4,635	16,653
9		5,455	19,566

2.5 Výsledky měření

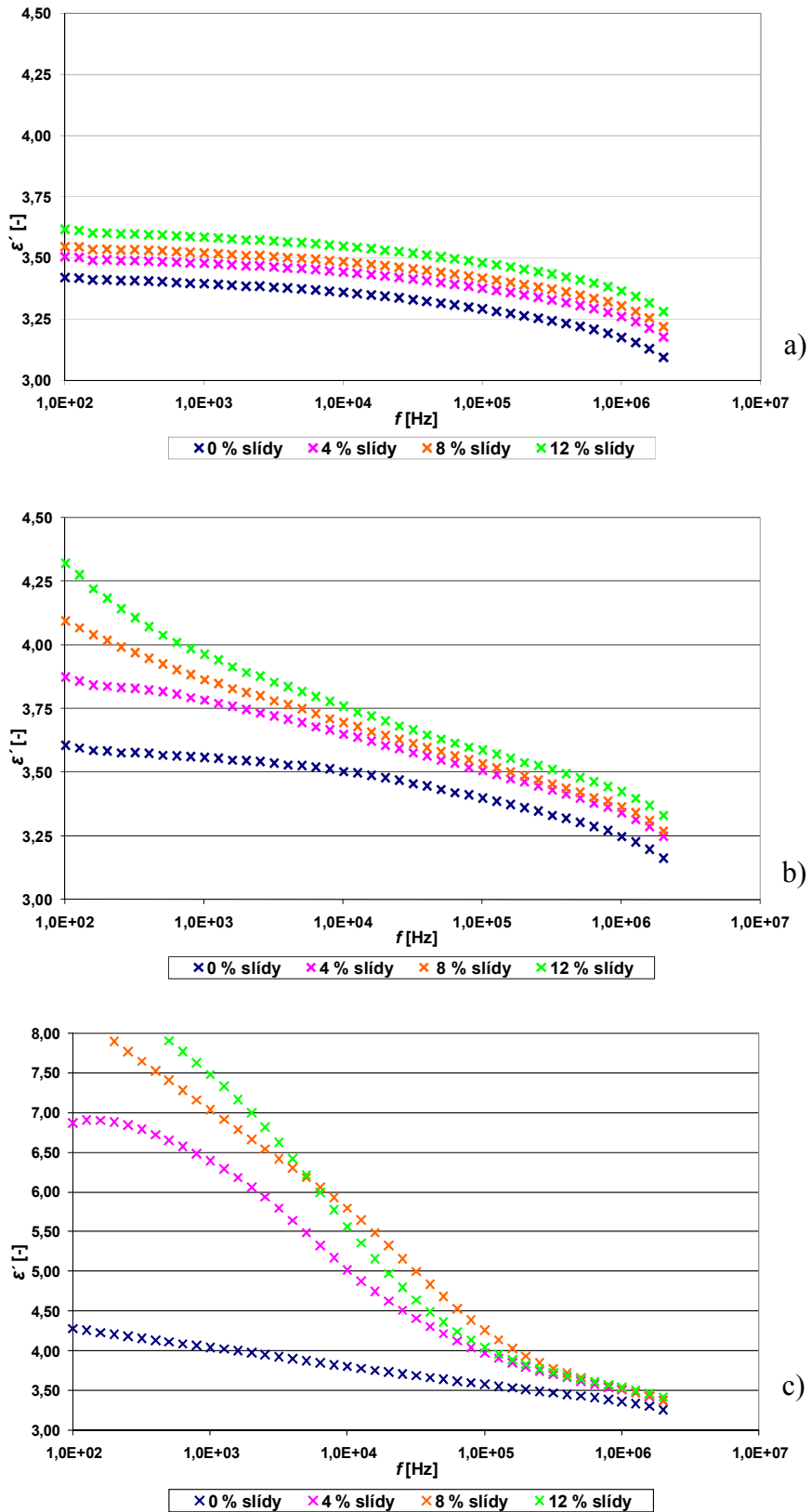
Měření kmitočtových závislostí relativní permitivity a ztrátového činitele bylo realizováno na 36 vzorcích (4 sady po 9 vzorcích) ve vysušeném stavu a v průběhu navlhání. Výsledky měření na vysušených vzorcích čistého laku při teplotě 20 °C ukazuje obr. 5 a obr. 6, pro další vyhodnocení byly použity průměry relativní permitivity a ztrátového čísla vybraných vzorků. Výsledky experimentu jsou vyjádřeny následujícími obrázky, které ukazují vliv zvyšující se teploty a relativní vlhkosti na kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla, tedy složky komplexní permitivity lakových vzorků s různým podílem mikromleté slídy. Měření byla provedena pro jednotlivé teploty a relativní vlhkosti lakových vzorků s různými podíly slídy opakovaně. Grafická vyjádření jsou uložena na příloženém CD.



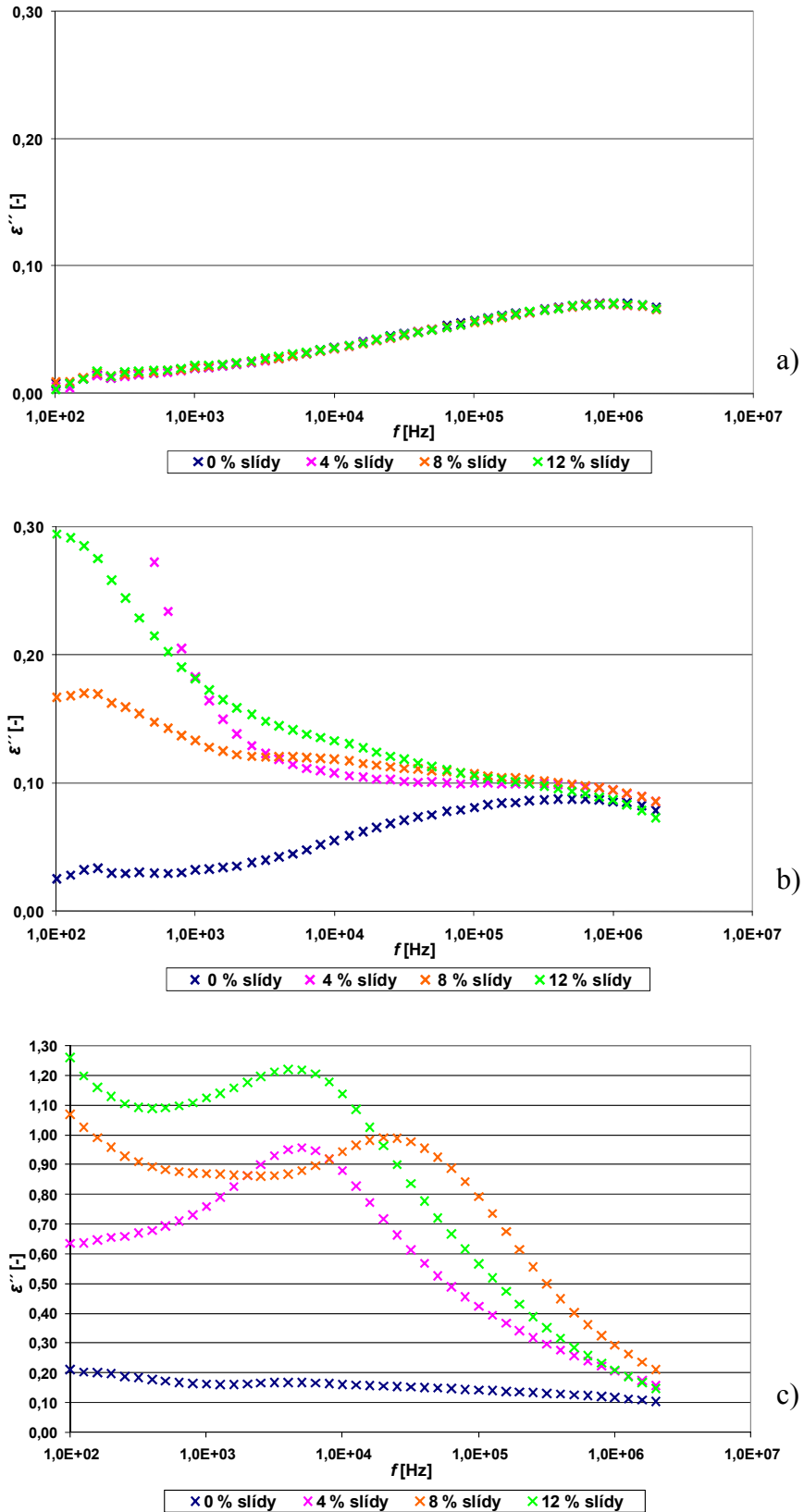
Obr. 5: Kmitočtová závislost relativní permitivity pro vzorky s 0% podílem mleté slídy při relativní vlhkosti 0%.



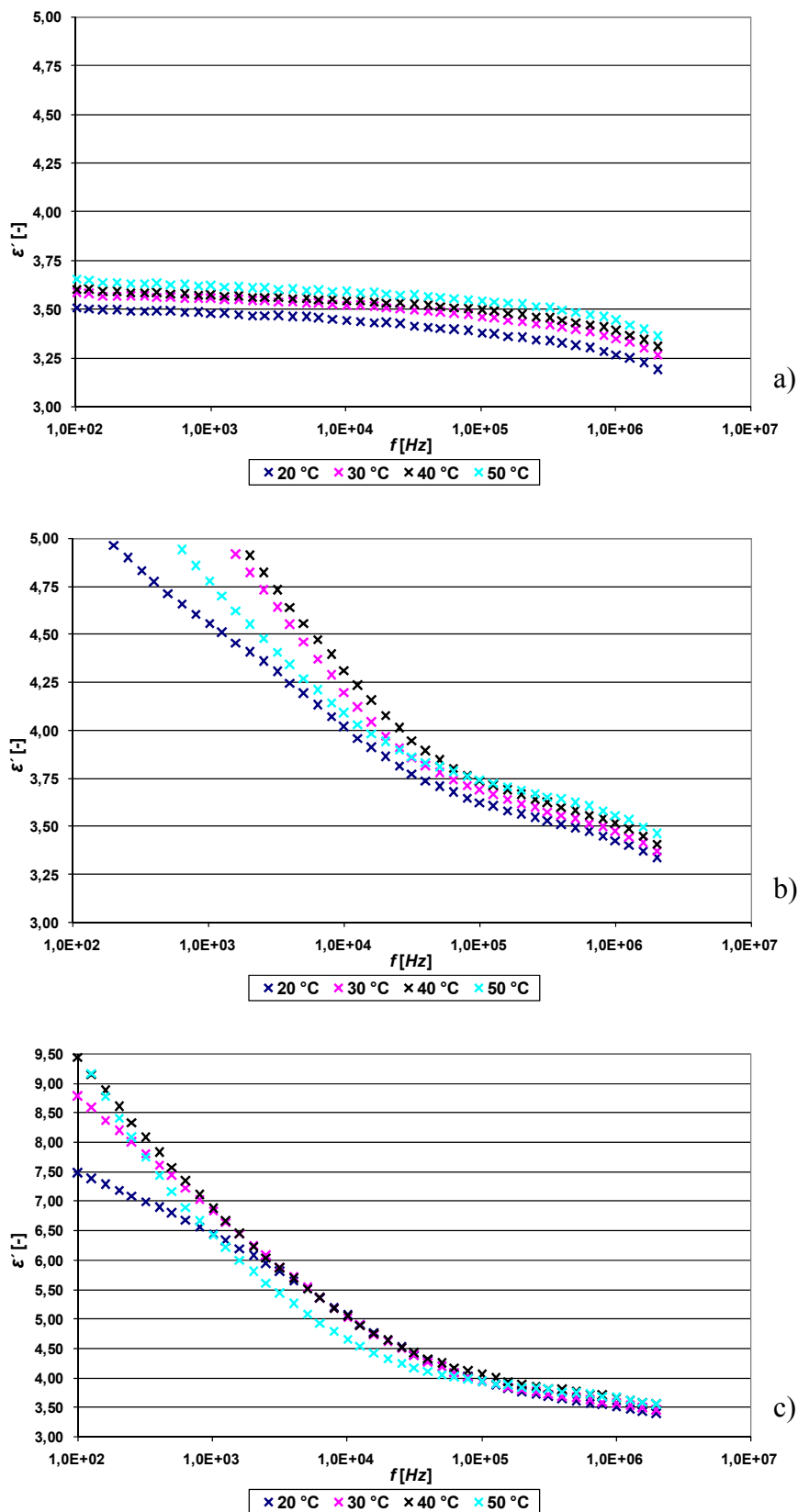
Obr. 6: Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro vzorky s 0% podílem slídy při relativní vlhkosti 0%.



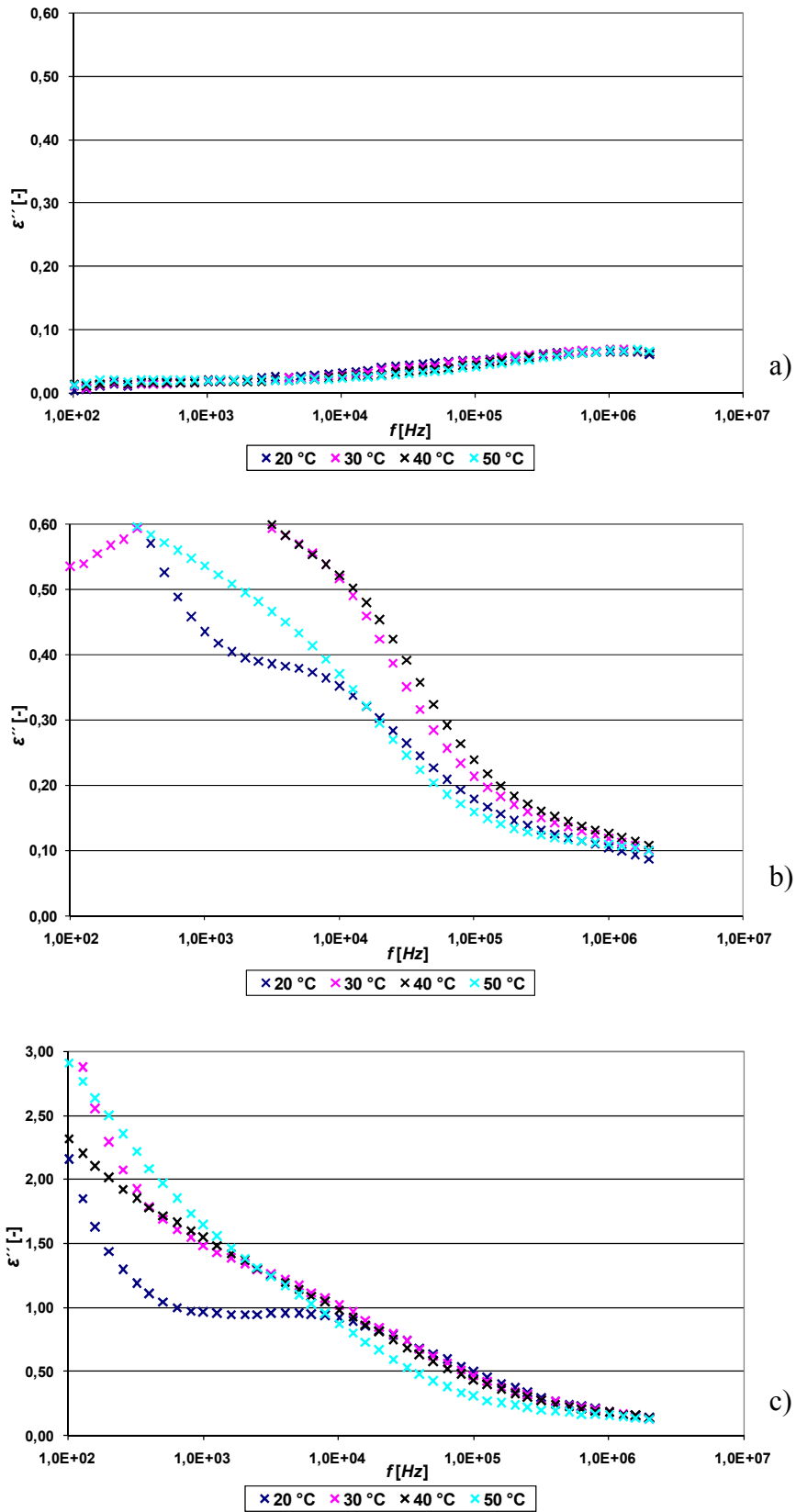
Obr. 7: Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků s různým plněním slídou a měnící se relativní vlhkosti 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c) při $\vartheta = 20$ °C.



Obr. 8: Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků s různým plněním slídou a měnící se relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c) při $\vartheta = 20$ °C.



Obr. 9: Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků, s 12% podílem mikromleté slídy, s měnící se teplotou a relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c).



Obr. 10: Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků, s 12% podílem mikromleté slídy, s měnící se teplotou a relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c).

Na obr. 5 a obr. 6 jsou grafické průběhy závislosti relativní permitivity (obr. 5) a ztrátového čísla (obr. 6) na kmitočtu pro vysušené vzorky vytvrzeného čistého laku při teplotě $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z obr. 5 je vidět, že hodnota relativní permitivity se pohybuje v rozmezí 2,70 až 3,30 (pro kmitočet 100 Hz). Tyto hodnoty s rostoucím kmitočtem klesají. Pro další vyhodnocování bylo použito průměrných hodnot zjištěných parametrů vzorků, u kterých vykazovaly průběhy nejmenší odchylky. Průměrná relativní permitivita je 3,24 pro kmitočet 100 Hz. Ztrátové číslo je kolem kmitočtu 100 Hz zanedbatelné, od kmitočtu 1 kHz se začínají ztráty zvyšovat, jak je vidět na obr. 6.

Z obr. 7 je patrné zvyšování hodnoty relativní permitivity u lakových vzorků s různým plněním slídou při rostoucí relativní vlhkosti. Pro hodnotu relativní vlhkosti 33 % (obr. 7 a)) je hodnota relativní permitivity lakového vzorku s 4% plněním slídy na kmitočtu 100 Hz 3,50. Při relativní vlhkosti 75 % (obr. 7 b)) je pro tento lakový vzorek na stejném kmitočtu hodnota relativní permitivity 6,86.

S rostoucí relativní vlhkostí u lakových vzorků s různým plněním slídou roste i ztrátové číslo a projevují se zde různá relaxační maxima, jak je vidět na obr. 8. Při relativní vlhkosti 33 % (obr. 8 a)) je ztrátové číslo lakových vzorků pro kmitočet 100 Hz zanedbatelné. S rostoucím kmitočtem vzrůstají ztrátová čísla lakových vzorků až k hodnotě 0,07 (pro kmitočet 1 MHz). Pro hodnoty vyšších relativních vlhkostí ztrátová čísla lakových vzorků rostou a mění svůj průběh, projevují se zde různá relaxační maxima. U relativní vlhkosti 75 % (obr. 8 c)) je ztrátové číslo při kmitočtu 100 Hz pro lakový vzorek s 4% podílem slídy 0,63 a do kmitočtu 5 kHz roste na 0,95, poté klesá až na hodnotu 0,14 při kmitočtu 1 MHz.

Relativní permitivita lakových vzorků vzrůstá také se zvyšující se teplotou a relativní vlhkostí. S rostoucím kmitočtem klesá a zachovává si svoji tendenci průběhu, viz obr. 9. Hodnota relativní permitivity lakového vzorku s 12% podílem slídy při relativní vlhkosti 33 % a pro teplotu $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je 3,51, při teplotě $\vartheta = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ je 3,66, pro kmitočet 100 Hz.

Ztrátová čísla lakových vzorků s 12% podílem slídy s rostoucí teplotou a relativní vlhkostí narůstají, tento nárůst je větší při nižších kmitočtech a projevují se zde různá relaxační maxima, jak je vidět na obr. 10.

2.6 *Matematická interpretace směsných vztahů*

Po změření vlastností všech vzorků při různých kmitočtech a teplotách byly na naměřené výsledky aplikovány směsné vztahy, které jsou uvedeny kapitole 1.5.2. Nejprve byly vypočteny z geometrických rozměrů a hmotností hustota čistě slídy a hustota čistého laku

$$\rho_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{slidy}}}{V_{\text{slidy}}} = \frac{0,6011 \cdot 10^{-3}}{0,2250 \cdot 10^{-6}} = 2671,52 \text{ kg m}^{-3} \quad (25)$$

$$\rho_{\text{laku}} = \frac{m_{\text{laku}}}{V_{\text{laku}}} = \frac{14,4268 \cdot 10^{-3}}{12,0524 \cdot 10^{-6}} = 1197,88 \text{ kg m}^{-3} \quad (26)$$

Poté byl vybrán jeden kmitočet (1002 Hz), pro který byly vypočteny hodnoty relativních permitivit vzorků s různým obsahem slídy. Před tím byl vypočítán objem celého vzorku, pomocí něj a hmotnostního podílu slídy a laku se vypočítal objem slídy a laku ve vzorku. Pro ukázkou je zde uveden příklad výpočtu pro vzorek číslo 8 s 4% podílem mikromleté slídy:

$$V_{\text{vzorku}} = \pi r^2 h = 3,14 (30,15 \cdot 10^{-3})^2 4,318 \cdot 10^{-3} = 12,3312 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (27)$$

$$m_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{vzorku}}}{100} 4 = \frac{15,028 \cdot 10^{-3}}{100} 4 = 0,6011 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad (28)$$

$$V_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{slidy}}}{\rho_{\text{slidy}}} = \frac{0,6011 \cdot 10^{-3}}{2671,52} = 0,2250 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (29)$$

$$v_1 = \frac{V_{\text{slidy}}}{V_{\text{vzorku}}} = \frac{0,2250 \cdot 10^{-6}}{12,3312 \cdot 10^{-6}} = 0,0182 \quad (30)$$

$$v_2 = 1 - v_1 = 1 - 0,0182 = 0,9818 \quad (31)$$

Z každé sady vzorků byly vybrány 2 vzorky, pro které byla vypočtena hodnota relativní permitivity podle směsných vztahů. Hodnoty ε'_1 a ε'_2 jsou odečteny ze změřených průměrných hodnot relativních permitivit čisté slídy (ε'_1) a čistého laku (ε'_2) pro daný kmitočet 1002 Hz. Vypočtené hodnoty byly srovnány s průměrnými hodnotami naměřených relativních permitivit lakových vzorků s odpovídajícím podílem mikromleté slídy (viz tab. 3, tab. 4, tab. 5). Pro ukázkou jsou zde uvedeny příklady výpočtů pomocí jednotlivých směsných vztahů pro vzorek číslo 8 s 4% podílem mikromleté slídy:

Lichteneckerův logaritmický vztah:

$$\begin{aligned} \log \varepsilon'_s &= v_1 \log \varepsilon'_1 + v_2 \log \varepsilon'_2 \\ \log \varepsilon'_s &= 0,0182 \log 5,0509 + 0,9817 \log 3,2241 \\ \log \varepsilon'_s &= 0,5119 \\ \varepsilon'_s &= 3,2506 \end{aligned} \quad (32)$$

Lichteneckerův mocniný vztah pro $k = 1$:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_s &= v_1 \varepsilon'_1 + v_2 \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_s &= 0,0182 \cdot 5,0509 + 0,9817 \cdot 3,2241 \\ \varepsilon'_s &= 3,2574 \end{aligned} \quad (33)$$

Lichteneckerův mocniný vztah pro $k = -1$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon'_s} &= v_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + v_2 \frac{1}{\varepsilon'_2} \\ \frac{1}{\varepsilon'_s} &= 0,0182 \frac{1}{5,0509} + 0,9817 \frac{1}{3,2241} \\ \varepsilon'_s &= 3,2455 \end{aligned} \quad (34)$$

Maxwellův vztah:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} &= 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \\ \varepsilon'_s &= \left(3v_1 \varepsilon'_2 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \right) + \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_s &= \left(3 \cdot 0,0182 \cdot 3,2241 \frac{5,0509 - 3,2241}{5,0509 + 2 \cdot 3,2241} \right) + 3,2241 \\ \varepsilon'_s &= 3,2521 \end{aligned} \quad (35)$$

Tab. 3: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 4% podílem slídy.

4% podíl slídy			
metoda výpočtu	vzorek číslo	vypočtené ε' [-]	změřené ε' [-]
Maxwellův vztah	8	3,252	3,141
Lichteneckerův vztah pro $k=1$		3,257	
Lichteneckerův vztah pro $k=-1$		3,246	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,251	
Maxwellův vztah	9	3,252	3,141
Lichteneckerův vztah pro $k=1$		3,258	
Lichteneckerův vztah pro $k=-1$		3,246	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,251	

Tab. 4: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 8% podílem slídy.

8% podíl slídy			
metoda výpočtu	vzorek číslo	vypočtené ϵ' [-]	změřené ϵ' [-]
Maxwellův vztah	8	3,279	3,247
Lichteneckerův vztah pro $k=1$		3,289	
Lichteneckerův vztah pro $k=-1$		3,266	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,276	
Maxwellův vztah	9	3,281	3,247
Lichteneckerův vztah pro $k=1$		3,292	
Lichteneckerův vztah pro $k=-1$		3,268	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,279	

Tab. 5: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 12% podílem slídy.

12% podíl slídy			
metoda výpočtu	vzorek číslo	vypočtené ϵ' [-]	změřené ϵ' [-]
Maxwellův vztah	8	3,311	3,313
Lichteneckerův vztah pro $k=1$		3,328	
Lichteneckerův vztah pro $k=-1$		3,292	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,307	
Maxwellův vztah	9	3,312	3,313
Lichteneckerův vztah pro $k=1$		3,328	
Lichteneckerův vztah pro $k=-1$		3,292	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,308	

3 Závěr

Po prostudování teorie kompozitních materiálů a směsných vztahů byla připravena sada zkušebních vzorků. K vlastnímu měření bylo použito epoxidového laku TSA 220S s různými hmotnostními podíly mikromleté slídy. Cílem bakalářské práce, který se podařilo splnit, bylo prošetřit a vyhodnotit vliv teploty a relativní vlhkosti na složky komplexní permitivity složených lakových materiálů s ohledem na podíl plniva.

Bylo zjištěno, že relativní permitivita u vysušených lakových vzorků s různým hmotnostním procentem slídy s rostoucím kmitočtem klesá. Relativní permitivita vzorků bez slídy je 3,24 (pro kmitočet 100 Hz). Hodnota relativní permitivity lakových vzorků s 12% hmotnostním podílem slídy je 3,33 (pro kmitočet 100 Hz). Přidaná slída tedy zvyšuje relativní permitivitu vzorků v řádech desetin. Při zvyšování hodnoty relativní vlhkosti prostředí vzrůstá relativní permitivita lakových vzorků s rostoucím podílem slídy v řádech desetin. Kmitočtové průběhy si zachovávají přibližně stejný tvar průběhu. Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se procentem slídy jako plniva je kompozitní materiál schopen více navlhát. Při zvyšující se teplotě hodnota relativní permitivity kompozitních materiálů opět stoupá při zachování tendence průběhu.

Měření dielektrických veličin bylo ovlivněno nedokonalé rovinným povrchem vzorků, což mělo za následek vznik vzduchových mezer mezi zkoumaným vzorkem a přiloženými elektrodami. Vzduchové mezery snižovaly výslednou kapacitu vzorků, proto je zapotřebí vyrábět vzorky s co nejrovnějším povrchem. Vzorky bylo nutné dále vkládat do elektrodového systému ve stejné poloze při každém měření, aby byl maximálně eliminován vliv nerovnosti vzorků na výsledky opakovaných měření.

Jako ověření naměřených hodnot byly pomocí směsných vztahů vypočteny hodnoty relativních permitivit pro dané podíly slídy ve vzorcích (4 %, 8 %, 12 %), podle několika směsných vztahů. Bylo zjištěno, že vypočtené hodnoty se od naměřených hodnot příliš neliší, což dokazuje správnost měření. Pouze pro lakové vzorky s 4% podílem slídy je rozdíl mezi oběma výsledky relativních permitivit větší (0,12). To může být způsobeno značnou nerovností lakových vzorků s 4% podílem slídy jako plniva. Jako nejvhodnější se pro výpočet jevil Lichteneckerův vztah pro $k = -1$, rovnice (15). Vzhledem k chaotickému uspořádání laku a slídy ve vzorcích by měl být nejvhodnější Lichteneckerův logaritmický vztah. Rozdíly mezi oběma výsledky jsou však zanedbatelné.

4 Použitá literatura

- [1] JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M., *Materiály a technická dokumentace, část Materiály v elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 129 stran.
- [2] KAZELLE, J., JIRÁK, J., VANĚK, J., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M., HAVLÍČEK, S., *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 273 stran.
- [3] MENTLÍK, V., *Dielektrické prvky a systémy*. BEN - technická literatura, 2006, 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [4] *Navlhání* [online]. [cit 2008-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/126926-nvlhani>>
- [5] *Dielektrikum* [online]. [cit 2008-10-20]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>>
- [6] SÝKORA, R., *Úvod do vlhkosti plynů*. 2006. 32 stran.
- [7] Agilent E4980A Precision LCR Meter [online]. [cit 2008-12-1]. Dostupný z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=715495&pageMode=OV&cc=US&lc=eng>>
- [8] Agilent 16451B Dielectric Test Fixture [online]. [cit 2008-12-3]. Dostupný z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=1000000046%3Aeps%3Apro&pageMode=OV&cc=US&lc=eng>>
- [9] Agilent E4980A Precision LCR Meter – *Operation Manual*. Yokogawa – Hewlett – Packard LTD 1989.
- [10] Agilent 16451B Dielectric Test Fixture – *Operation and Service Manual*. Yokogawa – Hewlett – Packard LTD 1989.
- [11] ARCO technik s.r.o. [online]. [cit 2009-4-21]. Dostupný z WWW: <http://www.arco.cz/datlisty/EpoxyLite_prehled_pouziti%20_soubory/..%5CEpoxyLite%20TSA%20220S.pdf>