



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

## VLASTNOSTI LAKOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PLNĚNÝCH MIKRO- A NANOČÁSTICEMI

PROPERTIES OF FILLED MICRO- AND NANOPARTICLES VARNISH COMPOSITES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Student:** Bc. Petr Novák

**ID:** 72779

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Vlastnosti lakových kompozitních materiálů plněných mikro- a nanočásticemi**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě dostupné literatury vytvořte rešerši o vlivu plniv, v podobě mikro- a nanočástic, na elektrické vlastnosti kompozitních izolačních materiálů. Zpracujte přehled diagnostických metod pro sledování elektrických vlastností izolačních materiálů ve střídavém elektrickém poli.

Připravte sady zkušebních lakových vzorků s různým hmotnostním podílem mikromleté slídy. Proměřte a vyhodnoťte vliv klimatických podmínek, zejména teploty a relativní vlhkosti, na složky komplexní permitivity složených lakových materiálů s ohledem na podíl plniva. Podejte možnou matematickou interpretaci zjištěných výsledků aplikací směsných vztahů. Výsledky dosažené za normálních atmosférických podmínek porovnejte s vlastnostmi vzorků elektroizolačního laku plněného nanočásticemi, které připravíte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Zdenka Rozsivalová

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## Abstrakt:

Předložená práce řeší problematiku přípravy zkušebních lakových vzorků plněných mikročásticemi slídy, nebo nanočásticemi oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Sleduje vliv klimatických podmínek a plniva na elektrické vlastnosti kompozitních materiálů. Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů jsou měřeny metodou dielektrické relaxační spektroskopie. Zkušební vzorky jsou tvořeny epoxidovou pryskyřicí TSA 220S a polyesterovou pryskyřicí DOLPHON XL 2102. Laky jsou modifikovány různým hmotnostním procentem nanočástic oxidu křemičitého, nebo mikromleté slídy. Výsledkem práce jsou kmitočtové závislosti složek komplexní permitivity kompozitního materiálu a jejich vyhodnocení.

## Abstract:

The presented work deals with preparation of test samples filled microparticles of mica and nanoparticles of silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ). Monitors the impact of climatic conditions and filler on electrical properties of composite materials. Electrical properties of composite materials are measured by dielectric relaxation spectroscopy. Test samples influence of epoxide resin TSA 220S and polyester resin DOLPHON XL 2102. Varnishes are modified with different weight percentage of nanoparticles of silicon dioxide, or micronized mica. The results of this project are frequency dependencies of parts of complex permittivity and their evaluation.

## Klíčová slova:

Dielektrikum, kompozity, mikrokompozity, nanokompozity, epoxidový lak TSA 220S, polyesterový lak DOLPHON XL 2102

## Keywords:

Dielectric, composite, microcomposite, nanocomposite, epoxide varnish TSA 220S, polyester varnish DOLPHON XL 2102

## Bibliografická citace díla:

NOVÁK, P. *Vlastnosti lakových kompozitních materiálů plněných mikro- a nanočásticemi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucí 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 26. 5. 2011

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Zdence Rozsivalové za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci.

# OBSAH

|  |               |
|--|---------------|
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>  | <b>- 6 -</b>  |
| <b>ÚVOD .....</b>  | <b>- 8 -</b>  |
| <b>1 TEORETICKÁ ČÁST.....</b>  | <b>- 9 -</b>  |
| 1.1 DIELEKTRIKA A JEJICH VLASTNOSTI .....  | - 9 -         |
| 1.2 DIELEKTRICKÁ POLARIZACE .....  | - 10 -        |
| 1.3 ELEKTRICKÁ VODIVOST .....  | - 12 -        |
| 1.4 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY .....  | - 13 -        |
| 1.5 HAVRILIAK-NEGAMIHO DISTRIBUČNÍ FUNKCE .....  | - 14 -        |
| 1.6 KOMPOZITY .....  | - 14 -        |
| 1.7 HISTORIE NANOTECHNOLOGIE .....   | - 18 -        |
| 1.8 NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....   | - 19 -        |
| 1.8.1 <i>Elektrické vlastnosti nanokompozitů a mikrokompozitů</i> .....  | - 20 -        |
| 1.8.2 <i>Nanokompozitní materiály s malou koncentrací plniva</i> .....   | - 21 -        |
| 1.8.3 <i>Vyvíjené metody zpracování polymerních nanokompozitů</i> .....  | - 27 -        |
| 1.9 TEORIE SLOŽENÉ SOUSTAVY .....  | - 31 -        |
| 1.9.1 <i>Permitivita složené soustavy</i> .....  | - 31 -        |
| 1.10 ELEKTROIZOLAČNÍ LAKY A JEJICH DRUHY .....   | - 33 -        |
| 1.10.1 <i>Klasifikace laků</i> .....   | - 34 -        |
| 1.11 SLÍDA A JEJÍ DRUHY .....  | - 34 -        |
| 1.12 NAVLHAVOST MATERIÁLŮ .....  | - 35 -        |
| 1.13 VLHKOST PLYNŮ .....   | - 35 -        |
| 1.14 TEPelné NAMÁHÁNÍ DIELEKTRIK .....   | - 36 -        |
| 1.15 DIAGNOSTICKÉ METODY PRO SLEDOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ<br>IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ VE STŘÍDAVÉM POLI ..... | - 37 -        |
| 1.15.1 <i>Metoda Scheringova můstku</i> .....  | - 37 -        |
| 1.15.2 <i>Metoda čtyřkapacitního můstku</i> .....  | - 38 -        |
| 1.15.3 <i>Metoda modifikovaného můstku pro rozsah 30 Hz do 300 kHz.</i> .....                                  | - 39 -        |
| 1.15.4 <i>Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát</i> .....   | - 40 -        |
| 1.15.5 <i>Rezonanční metoda měření nakmitaného napětí (Q-metr)</i> .....                                       | - 41 -        |
| <b>2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>   | <b>- 43 -</b> |
| 2.1 ZKUŠEBNÍ VZORKY .....  | - 43 -        |
| 2.1.1 <i>Impregnační laky</i> .....  | - 43 -        |
| 2.1.2 <i>Plniva</i> .....  | - 44 -        |
| 2.1.3 <i>Výroba lakových vzorků</i> .....  | - 45 -        |
| 2.1.4 <i>Příprava vzorků před měřením</i> .....  | - 47 -        |
| 2.2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ .....  | - 48 -        |
| 2.3 VÝPOČET SLOŽEK KOMPLEXNÍ PERMITIVITY .....   | - 50 -        |
| 2.4 TLOUŠTKY A HMOTNOSTI LAKOVÝCH VZORKŮ .....   | - 50 -        |
| 2.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....  | - 53 -        |
| 2.6 MATEMATICKÁ INTERPRETACE SMĚSNÝCH VZTAHŮ .....   | - 65 -        |
| 2.7 MATEMATICKÁ INTERPRETACE POMOCÍ HAVRILIAK-NEGAMIHO FUNKCE .....  | - 71 -        |
| <b>3 ZÁVĚR .....</b>   | <b>- 73 -</b> |
| <b>4 POUŽITÁ LITERATURA .....</b>  | <b>- 75 -</b> |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>  | <b>- 78 -</b> |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |        |
|---|--------|
| Obr. 1 a) Molekuly dielektrika nepolárního (bez elektrického pole), b) Napolární dielektrikum v elektrickém poli .....  | - 10 - |
| Obr. 2 a) Molekuly polárního dielektrika (bez elektrického pole), b) Polární dielektrikum v elektrickém poli .....  | - 10 - |
| Obr. 3 Havriliak-Negamiho diagram se dvěma distribučními parametry [16]. .....  | - 14 - |
| Obr. 4 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [9]. .....  | - 15 - |
| Obr. 5 a) Částicový kompozitní materiál, b) Vláknový kompozitní materiál s krátkými vlákny, c) Vláknový kompozitní materiál s dlouhými vlákny, d) Vláknový kompozitní materiál s dlouhými vlákny (rohože) [15]. ..... | - 16 - |
| Obr. 6 Konvenční kompozit a nanokompozit na bázi destičkovitých částic jílu, montmorillonitu [9]. .....   | - 17 - |
| Obr. 7 Disperze nanočástic TiO <sub>2</sub> v epoxidové pryskyřici s 1% hmotnostním plněním [21]. .....   | - 22 - |
| Obr. 8 Disperze nanočástic TiO <sub>2</sub> v epoxidové pryskyřici s 10% hmotnostním plněním [21]. ....   | - 22 - |
| Obr. 9 Kmitočtové závislosti relativní permitivity epoxidových nanokompozitních vzorků plněných Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [21]. .....  | - 24 - |
| Obr. 10 Kmitočtové závislosti relativní permitivity epoxidových nanokompozitních vzorků plněných TiO <sub>2</sub> [21]. .....   | - 24 - |
| Obr. 11 Kmitočtové závislosti ztrátového činitele epoxidových nanokompozitních vzorků plněných Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [21]. .....   | - 26 - |
| Obr. 12 Kmitočtové závislosti ztrátového činitele epoxidových nanokompozitních vzorků plněných TiO <sub>2</sub> [21]. .....   | - 26 - |
| Obr. 13 Proces interkalace a exfoliace polymerních nanokompozitů [24]. .....  | - 29 - |
| Obr. 14 Scheringův vysokonapěťový můstek [16]. .....  | - 38 - |
| Obr. 15 Zapojení čtyřkapacitního Scheringova můstku [16]. .....   | - 39 - |
| Obr. 16 Modifikovaný Scheringův můstek pro kmitočty 30 Hz až 300kHz [16]. .....   | - 40 - |
| Obr. 17 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát [16]. .....  | - 41 - |
| Obr. 18 Schéma rezonanční metody (Q metr) pro měření tg δ [16]. .....   | - 41 - |
| Obr. 19 Rozměry hliníkových forem pro odlévání vzorků [17]. .....   | - 46 - |
| Obr. 20 Schéma měřicího elektroodového systému Agilent 16451B [1]. .....  | - 49 - |

|  |        |
|--|--------|
| Obr. 21 Kmitočtová závislost relativní permitivity pro vzorky s 0% podílem mleté slídy při relativní vlhkosti 0 %.   | - 53 - |
| Obr. 22 Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro vzorky s 0% podílem slídy při relativní vlhkosti 0 %.  | - 53 - |
| Obr. 23 Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků s různým plněním slídou a měnící se relativní vlhkosti 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c) při $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . | - 54 - |
| Obr. 24 Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků s různým plněním slídou a měnící se relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c) při $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .      | - 55 - |
| Obr. 25 Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků, s 12% podílem mikromleté slídy, s měnící se teplotou a relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c).                           | - 56 - |
| Obr. 26 Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků, s 12% podílem mikromleté slídy, s měnící se teplotou a relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c).                                | - 57 - |
| Obr. 27 Závislost $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$ lakového vzorku s 12% plněním slídou a relativní vlhkostí 33 % při $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .                                      | - 58 - |
| Obr. 28 3D graf závislosti relativní permitivity na teplotě a kmitočtu pro lakové vzorky s 8% plněním slídou při relativní vlhkosti 33 %.  | - 58 - |
| Obr. 29 Kmitočtová závislost relativní permitivity pro vzorky s 0% podílem plniva.   | - 60 - |
| Obr. 30 Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro vzorky s 0% podílem plniva.  | - 60 - |
| Obr. 31 Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků s různým plněním a měnícím se typem plniva, mikročástic slídy (a), nanočástic $\text{SiO}_2$ (b).                                  | - 61 - |
| Obr. 32 Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků s různým hmotnostním plněním a měnícím se typem plniva, mikročástic slídy (a), nanočástic $\text{SiO}_2$ (b).                           | - 62 - |
| Obr. 33 Závislost $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$ lakového vzorku se 4% plněním slídou.  | - 63 - |
| Obr. 34 Závislost $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$ lakového vzorku s 8% plněním slídou.   | - 63 - |
| Obr. 35 3D graf závislosti relativní permitivity na hmotnostním plnění slídou a kmitočtu pro lakové vzorky.  | - 63 - |
| Obr. 36 Kmitočtové závislosti naměřených a vypočtených hodnot ztrátového čísla lakového vzorku s 12% podílem mikromleté slídy s teplotou $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí 55 %.       | - 72 - |

# Úvod

Dielektrické materiály jsou v dnešní době hojně používány v nejrůznějších oblastech elektrotechniky. Nároky na co nejlepší vlastnosti těchto materiálů rostou spolu se zvyšující se kvalitou výrobků. V oblasti dielektrických materiálů se díky výzkumu a rostoucím nárokům na spolehlivost systému zdokonalují jejich mechanické a hlavně elektrické vlastnosti. Mezi tyto materiály se řadí v dnešní době často používané mikrokompozity a v posledních několika letech nanokompozity.

Přimícháním částic o mikrometrických rozměrech do polymerní matrice vzniká kompozitní materiál, mikrokompozit. Mikrokompozity se vyznačují lepšími mechanickými vlastnostmi (pevnost, tvrdost, pružnost, atd.) oproti materiálům tvořeným samotnou polymerní maticí bez plniva. Přimícháním částic o rozměrech v řádu desítek nanometrů vzniká nanokompozitní materiál, ve kterém dochází k výrazným změnám vlastností oproti konvenčním materiálům. Důvodem významných změn vlastností jsou fázová rozhraní použitých materiálů k výrobě nanokompozitu. Proto se na tuto oblast soustředí enormní úsilí v oblasti základního výzkumu.

V osmdesátých letech dvacátého století byly vynalezeny přístroje, které umožňují měřit vlastnosti a manipulovat s nanostrukturami a výrazně tak napomohly značnému technickému rozvoji v tomto vědním oboru. V posledních deseti letech je vyvíjeno velké úsilí ve výzkumu z oblasti nanoelektroniky a aplikacích, které zlepšují stávající technologie.

Cílem této práce je seznámení se s teoretickými vlastnostmi dielektrických kompozitních materiálů plněných částicemi o velikostech zrn od řádů mikrometrů ( $\mu\text{m}$ ) až po velikosti nanometrů (nm). Zhotovení sady zkušebních lakových vzorků plněných různým hmotnostním podílem mikromleté slídy a nanočástic  $\text{SiO}_2$ . Následné sledování vlivu typu plniva a klimatických podmínek na elektrické vlastnosti kompozitních materiálů metodou dielektrické relaxační spektroskopie na těchto vzorcích.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Dielektrika a jejich vlastnosti

Dielektrikum je látka, ve které vnější elektrické pole (například mezi deskami kondenzátoru) 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), 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. „Izolant“ je materiál mající schopnost zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. 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, kterou tvoří molekuly, polárnost či nepolárnost molekuly souvisí s prostorovým uspořádáním, vztahy mezi jednotlivými atomy a typem vazby.

### ***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 (bez elektrického 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 [13].

Veličina, která přímo souvisí s polarizací, se nazývá relativní permitivita  $\epsilon'$ . Relativní permitivita je činitel úměrnosti mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole. Jedná se o bezrozměrnou fyzikální veličinu závislou na kmitočtu působícího elektrického pole a na teplotě. Pro výpočet relativní permitivity lze použít vztah (1), udávající vztah mezi naměřenou kapacitou a geometrickou kapacitou elektrodového systému

$$\epsilon' = \frac{C_x}{C_0} \quad (1)$$

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

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

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

kde  $\mu_i$  je indukovaný dipólový moment objemu  $V$ .

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

### ***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 rovnovážných poloh na malé vzdálenosti. Nejsou závislé na teplotě a na kmitočtu. Mezi pružné mechanismy 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.

### ***Relaxační polarizace***

Po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu, po jeho odpojení 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)  $\tau$ . K pomalým relaxačním mechanismům řadíme polarizaci dipólovou a 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.

## **Zvláštní polarizace**

Zvláštní polarizace dělíme na:

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

**Polarizace mezivrstvá (migrační)** – ze skupiny 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 ve feroelektrických látkách, 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 [13].

## **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 rezistivity (měrného elektrického odporu)  $\rho$  a konduktivity (měrné elektrické vodivosti)  $\gamma$ . 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,  $\mu$  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 [13].

## 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 před napětím o fázový úhel  $\varphi = 90^\circ$ . V reálném dielektriku je tento fázový posun zmenšen o ztrátový úhel  $\delta$  [16].

Velikost dielektrických ztrát vyjadřují:

- ztrátový úhel  $\delta$
- 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.

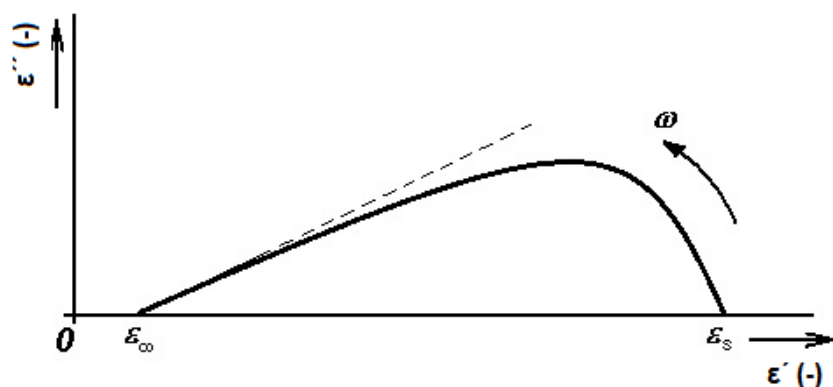
**Ionizační ztráty** – vyskytují se u plynů, tuhých a kapalných dielektrik s plynovými vměstky. Podmínkou vzniku je překročení tzv. prahu ionizace daného plynu.

### 1.5 Havriliak-Negamiho distribuční funkce

Pro popis dielektrické relaxace existuje několik různých, více či méně empirických funkcí. Havriliak-Negamiho funkce je vyjádřena vztahem:

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left(1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}\right)^\beta}, \quad (6)$$

kde  $\alpha$  je parametr charakterizující šířku relaxačního spektra,  $\beta$  parametr charakterizující asymetrii křivky,  $\tau_0$  je poloha relaxačního maxima,  $\varepsilon_s$  je statická permitivita a  $\varepsilon_\infty$  je optická permitivita [16].



Obr. 3 Havriliak-Negamiho diagram se dvěma distribučními parametry [16].

### 1.6 Kompozity

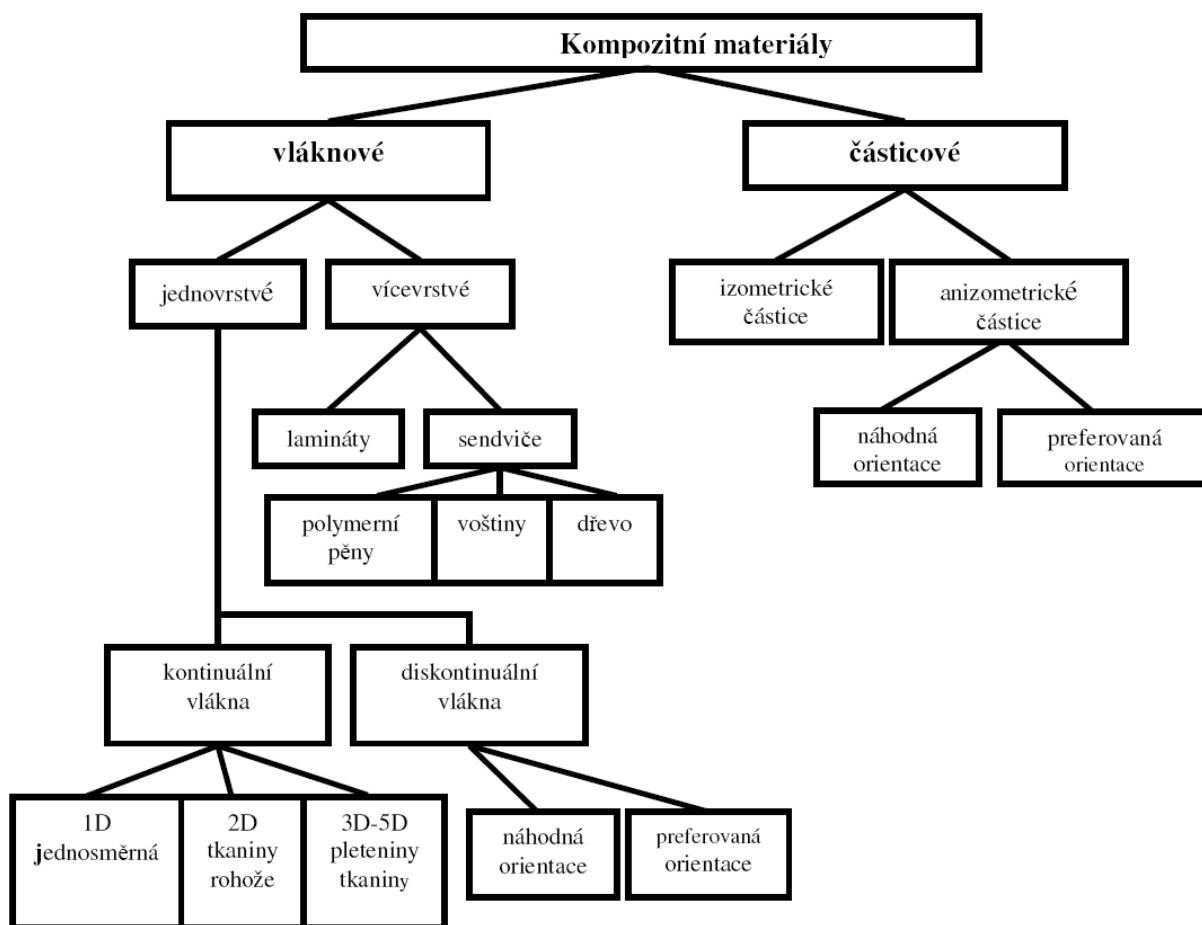
Kompozity jsou složené materiály, představující směsnou soustavu, tvořenou makroskopickými útvary dvou či více materiálových složek. Složeným materiálem lze nazvat soustavu, která vyhovuje těmto kritériím [14]:

- 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 [14]:

- dosažení lepších mechanických vlastností
- dosažení vyšší tvarové stability
- dosažení vhodnějších 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. Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže je uvedeno v obr. 4.



Obr. 4 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [9].

## Částicové kompozity

Jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Vyztužující částice mají tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý a nepravidelný. Pro tyto kompozity jsou využívány výztuže z tvrdých a termodynamicky stabilních sloučenin, jako jsou karbid křemíku (SiC) a oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve formě nepravidelných částic.

Tab. 1 Vlastnosti oxidu hlinitého a karbidu křemíku.

| materiál                | hustota ( $\text{kg m}^{-3}$ ) | tvrdost podle Knoop | pevnost v tlaku (GPa) |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 3950                           | 2000                | 2500                  |
| SiC                     | 3210                           | 2480                | 2800                  |

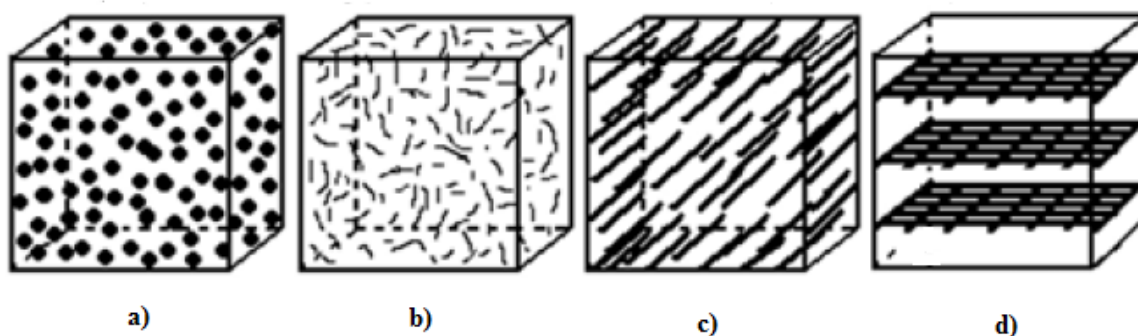
## Vláknové kompozity

Výztuž těchto kompozitních materiálů je v jednom směru výrazně rozměrnější. Vláknové kompozity dělíme podle délky vlákna výztuže na kompozity s krátkými a dlouhými vlákny.

**Výztuž s krátkými vlákny** – délka vláken je výrazně menší oproti velikosti daného výrobku.

**Výztuž s dlouhými vlákny** – délka vláken je srovnatelná s velikostí daného výrobku.

U těchto kompozitů jsou využívány výborné mechanické vlastnosti vláken ve směru jejich osy - vysoká pevnost a modul pružnosti. Vlákna mají mnohem lepší mechanické vlastnosti v porovnání se stejným, ale masivním materiálem. Příčinou je pokles velikosti strukturních defektů ve vláknech, orientace defektů ve směru vláken a snížení celkové pravděpodobnosti výskytu defektů. Nejvýznamnějšími druhy vláken jsou vlákna bórová, uhlíková, oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a karbidu křemíku (SiC) [15].



Obr. 5 a) Částicový kompozitní materiál, b) Vláknový kompozitní materiál s krátkými vlákny, c) Vláknový kompozitní materiál s dlouhými vlákny, d) Vláknový kompozitní materiál s dlouhými vlákny (rohože) [15].

## **Makrokompozitní materiály**

Obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru  $10^0$  až  $10^2$  mm. Jsou používány především ve stavebnictví (železobeton) a lze za ně považovat i plátované kovy.

## **Mikrokompozitní materiály**

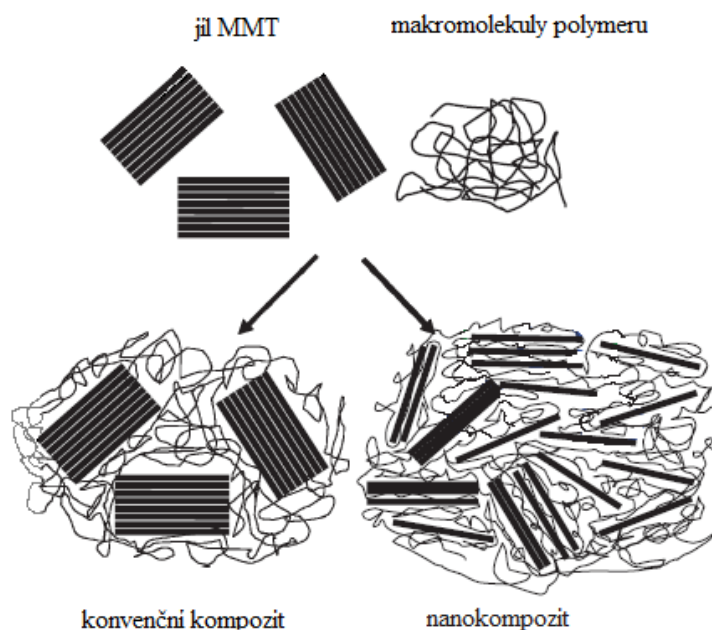
Mají největší význam v průmyslu. Největší příčné rozměry výztuže (vláken nebo částic) jsou v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Oproti kovům a jejich slitinám mají mikrokompozitní materiály menší hustotu a tedy příznivější poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, tj. dosahují větší měrné pevnosti a měrného modulu.

**Částicové mikrokompozity** – obvykle se jedná o anorganické (destičkovité) částice, které mají určitý štíhlostní (aspektní) poměr  $l \ t^{-1}$ , kde  $l$  je délka a  $t$  tloušťka částice.

**Vláknové mikrokompozity** – jsou to mikrokompozity obsahující, buď diskontinuální vlákna, která mají aspektní poměr  $l \ d^{-1}$ , kde  $l$  je délka a  $d$  je průměr vlákna, nebo kontinuální vlákna. Kontinuální vlákna mohou být například skleněná, křemenná ( $\text{SiO}_2$ ), uhlíková (novoloid), polymerní, keramická ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kovová (korozivzdorné oceli) [9].

## **Nanokompozitní materiály**

Jsou kompozitní materiály, které mají rozměr výztuže (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách nm, tedy v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$  nm. Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem s výztuží na bázi destičkovitých částic jílu, montmorillonitu (MMT) ukazuje obr. 6 [9].



Obr. 6 Konvenční kompozit a nanokompozit na bázi destičkovitých částic jílu, montmorillonitu [9].

## 1.7 Historie nanotechnologie

Jako „prehistorii nanotechnologií“ můžeme označit přidávání prášků kovů a jiných látek skláři do skel pro dosažení zajímavých barevných efektů. Jak se později ukázalo, byly mezi nimi i částice o rozměru nanometrů. Znamé jsou tzv. Lykurgovy poháry pocházející asi ze 4. století našeho letopočtu, obsahující nanočástice slitiny na bázi Au – Ag. Není známo, jakou technologii výroby těchto pohárů římská skláři používali. V roce 1861 jako první popsal suspenzi obsahující částice o rozměrech 1 – 100 nm Thomas Graham, britský chemik, a nazval ji koloidním systémem. Koloidní systémy byly intenzivně sledovány významnými vědci a později vznikl nový obor koloidní chemie. Velmi známým příkladem nanomateriálů jsou saze, které se vyrábějí nedokonalým spalováním organických látek bohatých na uhlík. Jedná se o částice amorfního uhlíku o velikosti 10 – 500 nm.

Jako první „průkopník“ nanotechnologie je označován Richard Philips Feynman. Ten v prosinci roku 1959 na zasedání Americké fyzikální společnosti na Kalifornské technologické univerzitě nastínil svou vizi nanotechnologií. Jeho přednáška měla název „There’s Plenty of Room at the Bottom“ („Tam dole je spousta místa“) a pojednávala o možnostech praktického využití světa atomů v budoucnosti. Během přednášky položil tuto otázku: „Proč bychom nemohli zapsat na špendlíkovou hlavičku všech 24 dílů Encyklopedie Britanniky?“ a následně dokázal, že tomu přírodní zákony nebrání a nabízí i odpověď, jakým způsobem text na tak malou plochu napsat. Od možnosti zápisu informací se Feynman dostal k možnostem, jak ovlivňovat na této atomární úrovni chemické reakce a k manipulaci s molekulami a atomy. V roce 1960 Bill McLellan zkonstruoval funkční miniaturní motorek, který se vešel do krychličky o hraně 0,4 mm [12].

Na Feynmanovy myšlenky navázal v 80. letech dvacátého století Kim Eric Drexler v knihách „Stroje stvoření: Nástup éry nanotechnologie“ (Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology) z roku 1986 a „Nanosystémy“ (Nanosystems) v roce 1992. V těchto knihách rozpracoval myšlenku nanotechnologické revoluce a popsal svět miniaturních umělých systémů, nanorobotů, které se budou podobat živým organismům schopností reprodukce, vzájemnou komunikací a sebezdokonalováním, přičemž jejich velikost bude na molekulární úrovni. Další z průkopníků nanotechnologie je Timothy Leary. Intenzivně se zabýval nanotechnologiemi a kryogenetikou. Tvrdil, že s rozvojem nanotechnologie by bylo možné vytvořit jakýkoliv předmět jen z prachu a slunečního svitu a stavba tryskových motorů by se stala záležitostí jedné minuty.

Feynman, Drexler a Leary byli v tehdejší době považováni spíše za blázny, ovšem prudký rozvoj oblastí nových technologií na konci dvacátého století jim začal dávat za pravdu.

Významným milníkem v nanotechnologiích byl v 80. letech objev rastrovacího mikroskopu SMT (Scanning Tunneling Microscope) a mikroskopu atomárních sil AFM (Atomic Force Microscope). Umožnily lidskému oku nahlédnout do mikrosvěta rozměrů nanometrů a menších. V roce 1985 se doktorandovi Stanfordské univerzity Tomovi

Newmanovi podařilo pomocí elektronového litografu napsal 25 000 krát zmenšeným písmem první stranu románu Charlese Dickense „Příběh dvou měst“.

Počátek 90. let dvacátého století znamenal nástup internetu, rozvoj mikrosystémového a geometrického inženýrství a první úspěšné pokusy technologií v měřítku nanometrů. V roce 1990 vědecký tým společnosti IBM pomocí tunelového skenovacího mikroskopu vytvořil logo své firmy na niklovou destičku 35 izolovanými xenonovými atomy. V dalším roce byly vyrobeny první uhlíkaté nanotrubičky a bylo demonstrováno vedení elektrického proudu jedinou molekulou. V laboratořích velkých amerických společností a univerzit se podařilo sestavit první nanomechanismy, jakými jsou například osy 10 000 krát tenčí než lidský vlas, neviditelná molekulová ložiska s ultranízkým třením, nanovláček, jezdící po jedné koleji, nebo první nanotranzistory využívající výhodných vlastností fullerenu [12].

### **1.8 Nanokompozitní materiály**

Vývoj nanokompozitů představuje velmi atraktivní cestu k aktualizaci a zpestření vlastností „starých“ polymerů, bez změny složení polymerního kompozitu a jeho zpracování. Na rozdíl od konvenčně plněných polymerů, jsou nanokompozity složeny z plniva o velikostech v řádech nanometrů („nanoplňiva“), které je stejnorodě rozloženo uvnitř matrice polymeru. Vzhledem k jejich velmi vysoké ploše povrchu, může jen několik procent nanoplňiv vytvořit kostru, zvláště když jsou používány anizotropní plniče s vysokým poměrem mezi délkou a průměrem. Ve srovnání s konvenčními mikrometrickými plnivými, obsahuje stejná objemová část nanoplňiva miliardové množství nanočástic. Následkem toho většina polymeru nanokompozitu je umístěna na rozhraní polymer-nanoplňivo. Změna z čistého polymeru na polymer s mezivrstvami představuje klíč k různorodým vlastnostem polymerů. Změnou poměru stran nanoplňiva je možné posílit matici polymeru a zlepšit i bariérový odpor proti vnikání plynů a kapalin. Důležitým hlediskem při výrobě nanokompozitů je výrobní technologie. Zatímco mnoho prefabrikovaných nanočástic se obtížně rozptyluje a požadují zvláštní bezpečnostní opatření při jejich manipulaci (pro jejich zacházení), moderní nanokompozity jsou vytvořené interkalací a exfoliací, což dává efektivní rozptyl polymeru mezi nanočásticemi.

Nanoplňiva s přidanými polymery nebo polymerní nanokompozity mohou být rozlišovány od mikronáplněných polymerů ze tří hlavních hledisek. Nanokompozity obsahují malé částice, které jsou velikostně v rozsahu nanometrů a jsou specifické značnou plochou povrchu. Všechny tyto charakteristické rysy se projevují na jejich materiálových vlastnostech. Prvním rozdílem vzbuzujícím zájem je rozdíl mezi množstvím plniva. Konvenčně naplněné polymery obvykle obsahují velké množství plniva, například více než 50 % hmotnosti. Proto jsou tyto materiály opravdu směsí polymerů s minerálními plnivými, což má za následek velkou změnu nebo rozdíl vlastností proti polymerům samotným. U nanoplňiv je jejich množství menší než 10 % hmotnosti dostačující k tomu, že některá ze skutečných vlastností polymeru, jako například hustota zůstane téměř nezměněna, dokonce i potom co se

stává nanokompozitem. Dalším charakteristickým znakem je rozdíl rozměrové velikosti částic plniva. Velikost částic plniva mezi těmito dvěma druhy materiálů se liší až o tři řády a v důsledku toho vznikají mnohem větší rozdíly například v hustotě materiálu, až o devět řádů. Vzdálenosti mezi sousedními částicemi plniva jsou mnohem menší u nanokompozitů, než v konvečně naplněných polymerech. V mnoha případech by mohla být vzájemná vzdálenost částic v rozsahu nanometrů, při homogenním rozptýlení částic. Poslední rozdíl se týká velké povrchové oblasti částic plniva. Povrch je nepřímo reprezentovaný velikostí. Velikost povrchu částic plniva je o tři řády větší u nanokompozitů než u konvenčně plněných polymerů. Některá nanoplňiva jsou na rozdíl od konvenčních plniv složena z polyelektrolytických vrstviček, které se rozpadnou a rozptýlí v průběhu zpracování. Toto tvoření vrstviček polyelektrolytu o velikostech nanometrů může mít významný dopad na dielektrické vlastnosti kompozitu [24].

### **1.8.1 Elektrické vlastnosti nanokompozitů a mikrokompozitů**

U nanokompozitů lze sledovat určité vlastnosti, jimiž se liší od běžných materiálů. Molekulový pohyb je zde omezen silnou vazbou mezi nanoplnivem a základem. Projevuje se zde také tzv. účinek bariéry v důsledku klikatých struktur způsobujících zvýšení transportních vzdáleností nosičů náboje. Tvorba nanometrických paprscitých útvarů a zachytávání nábojů nabitými plnivy, mají pravděpodobně za následek zmenšení volných cest a potlačení nárazové ionizace. Mezi nejzajímavější takové materiály patří polymerová kompozitní dielektrika plněná malým množstvím (jednotky hmotnostních procent) nanoplniv. Nejvíce zkoumané systémy jsou na bázi epoxidové pryskyřice, silikonových pryží nebo polyamidu a nanoplniv. Nanoplňiva jsou oxidy hliníku a křemičitany, jílky a další kovy. Obrovský vliv na funkční vlastnosti těchto látek má průběh zpracování a obsah nečistot a příměsí [6].

**Permitivita** – permitivita obvykle roste, při plnění polymerů anorganickými plnivy mikrometrových rozměrů v řádu několika desítek procent. Je to vysvětlováno na základě Lichtenecker - Rothernova logaritmického zákona mísení. Je to dáno tím, že plniva mají přirozeně vyšší permitivitu než neplněné polymery a také způsobují mezivrstvou polarizaci Maxwell – Wagnerova typu, která zvyšuje ztrátový činitel. Je-li kompozit plněn nanočásticemi v řádu několika procent, je v mnoha případech pozorován pokles permitivity. Přirozeně lze pozorovat i zvýšení hodnot, zvláště v důsledku náhodných nedokonalostí, jako jsou nerovnoměrný rozptyl a hromadění nanoplniv, zbytky urychlovače tuhnutí ředidla, nečistoty neúmyslně přimíchané během výrobních procesů. Ukazuje se, že permitivita má tendenci klesat, pokud nanostruktury zaujímají správné místo. To je připisováno omezení pohyblivosti polymerového řetězce nanočásticemi [6].

**Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$**  – snížení ztrátového činitele může být pozorováno například u nanokompozitu epoxid – oxid titaničitý, zvláště při nízkých kmitočtech a vysokých teplotách. Z měření uvedených [24] vyplývá, že díky nanosložení ztrátový činitel vzrůstá proti běžným materiálům v oblasti nízkých kmitočtů a klesá v oblasti středních a vysokých

kmitočtů. Naopak křemičitanový epoxidový nanokompozit vykazuje nižší hodnoty ztrátového činitele než základní pryskyřice při síťovém kmitočtu a opačně je tomu při kmitočtech vyšších než 100 kHz. Při síťových kmitočtech a vyšších má včlenění nanočástic vyšší permitivity za následek kompozity, které mohou vykazovat velikost permitivity nižší, než základní polymer a obsažené nanočástice. Toto chování může vyplývat ze způsobu upevnění nanočástic v matrici, které dává možnost vzniku disperze na rozhraních. Toto snížení je důležité i z praktického hlediska, protože může být použito jako způsob snížení jalového proudu, což je významný faktor, například u kabelových izolací [6].

**Prostorový náboj** – z [24] vyplývá, že nanostruktury mají tendenci prostorový náboj snižovat. Při použití plniva o mikrorozměrech je elektrické pole prostorového náboje téměř dvojnásobné, oproti případu, kdy je použito nanoplňivo. Chování výše popsaných a pravděpodobně i dalších nanokompozitů, pokud jde o tvorbu prostorového náboje, lze shrnout do tvrzení, že nahromaděný náboj a prahové pole jeho vstřikování jsou sníženy.

**Elektrická pevnost** – z měření a dalších zdrojů uvedených v [24] vyplývá, že nanokompozit epoxid – oxid titaničitý nevykazuje téměř žádnou změnu ve stejnosměrné krátkodobé elektrické pevnosti až do přidání nejméně 10 % hm. nanoplňiva. Oproti tomu výše zmíněný kompozit, obsahující mikroplňivo, vykazuje velké snížení elektrické pevnosti při zvyšujícím se obsahu mikroplňiva z nulového obsahu. To lze považovat za důkaz toho, že nanokompozity mají kladný vliv na elektrickou pevnost ve srovnání s mikrokompozity. Přidáním velmi malého množství (0,5 až 1 % hm.) ZnO nanočástic do epoxidové pryskyřice má za následek podstatné zvýšení doby do průrazu. Toto chování může být vysvětleno tím, že je růst průrazného „stromečku“ zpomalen, nebo je jeho rozšiřování blokováno nanočásticemi nanoplňiva. Díky tomuto bude čas do průrazu vzrůstat.

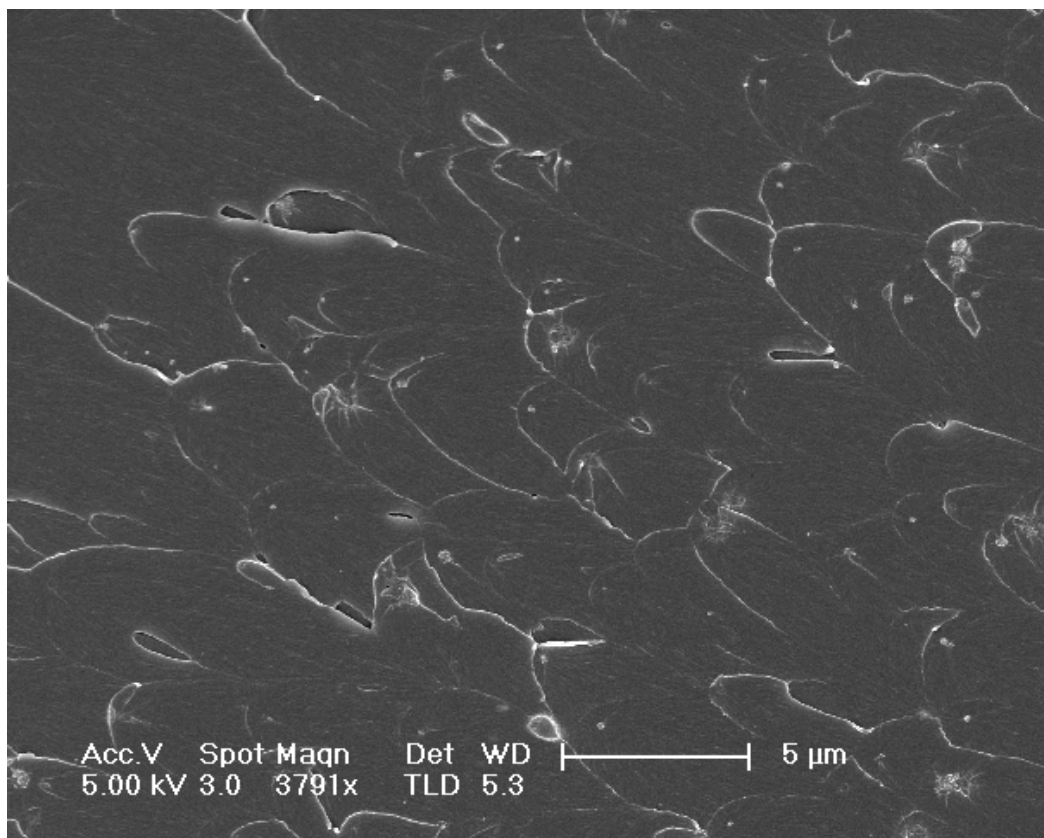
**Odolnost proti částečným výbojům** – ze [24] plyne, že odolnost proti částečným výbojům je u nanokompozitů značně zvýšena. Toto chování je způsobeno např. vzájemnou pojivovou silou mezi plnivem a matricí, morfologií meziplňivového prostoru, prostorem mezi plnivem anebo objemem matrice obklopené sousedním plnivem [6].

### **1.8.2 Nanokompozitní materiály s malou koncentrací plniva**

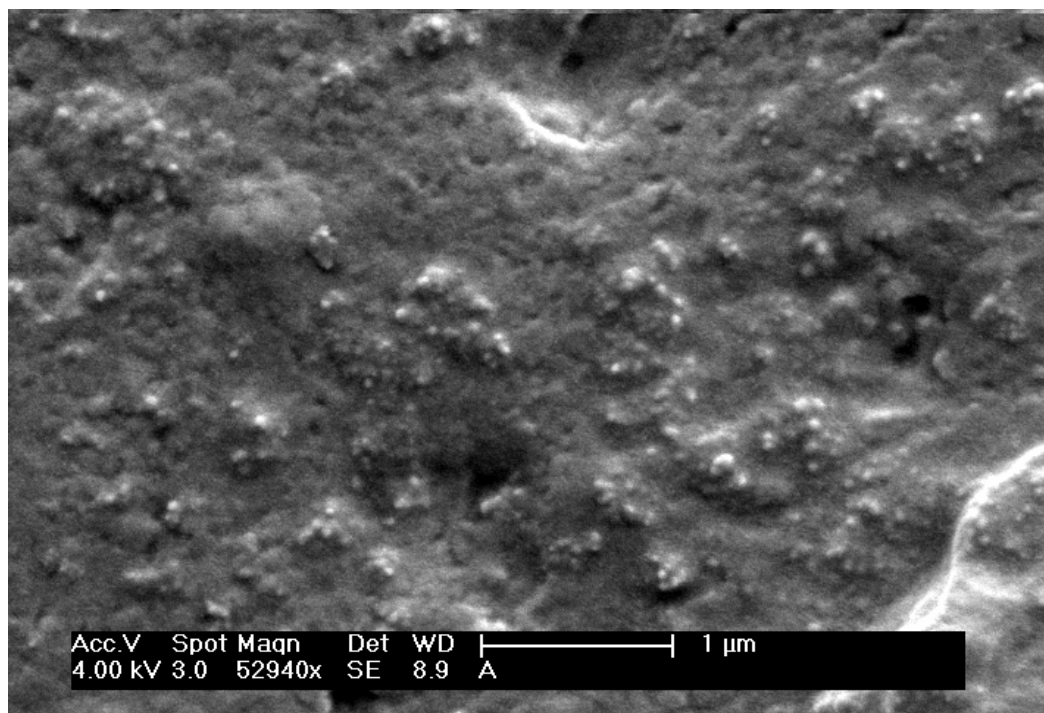
Teprve v nedávné době se objevily literaturní zdroje, zkoumající permitivitu a ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  polymerních nanokompozitů [11], [26]. Většina těchto pramenů vyšetřovala vliv plniva s koncentrací vyšší než 5 % hmotnosti [7], [24]. Informace o dielektrických vlastnostech polymerních nanokompozitů s nízkou koncentrací plniva (nižší jak 2 % hm. plniva) jsou v literatuře velmi vzácné. Proto jsou zde uvedeny výsledky měření v článku [21].

V experimentu byla použita epoxidová pryskyřice s plnivem v podobě nanočástic  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{TiO}_2$  s velkým rozdílem permitivit a průměrnou velikostí částic 45 nm a 50 nm. Nanoplňiva byla nakoupena od firmy Sigma Aldrich. Byly měřeny charakteristiky permitivity a ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  v kmitočtovém rozsahu 1 MHz až 1 GHz. Všechna měření byla

provedena při teplotě 27 °C a relativní vlhkosti 60 %. Na obr. 7 a obr. 8 jsou vidět snímky pořízené elektronovým mikroskopem, ukazující disperzi nanočástic TiO<sub>2</sub> v epoxidové pryskyřici [21].



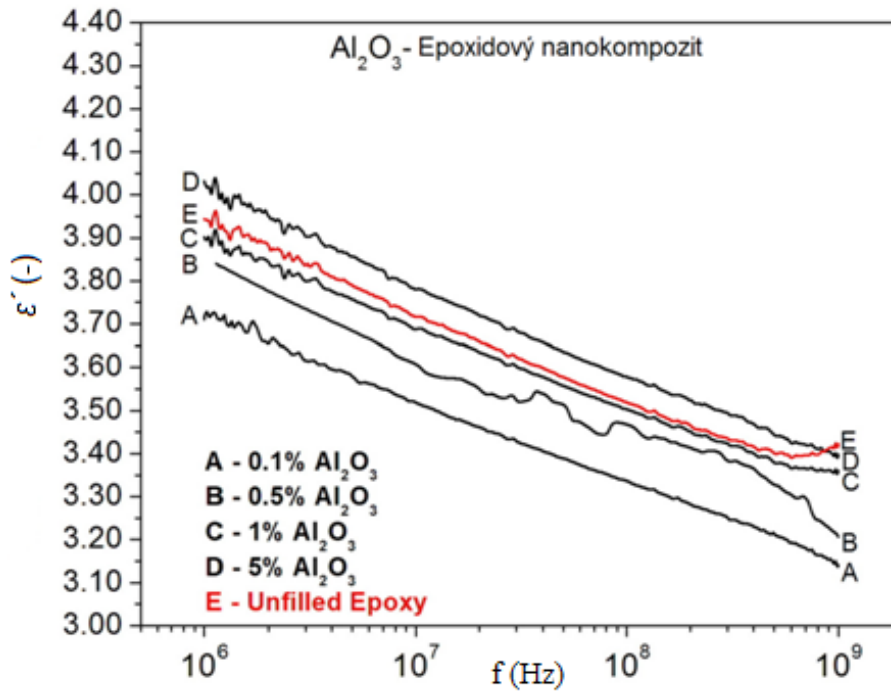
Obr. 7 Disperze nanočástic TiO<sub>2</sub> v epoxidové pryskyřici s 1% hmotnostním plněním [21].



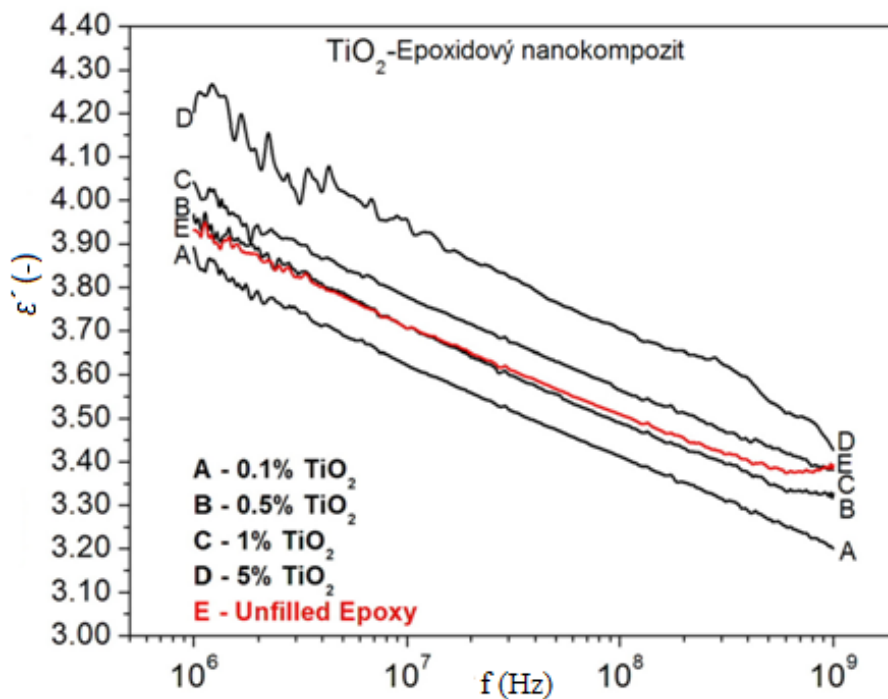
Obr. 8 Disperze nanočástic TiO<sub>2</sub> v epoxidové pryskyřici s 10% hmotnostním plněním [21].

## **Permitivita**

Vyhodnocené kmitočtové závislosti efektivní permitivity nanokompozitních vzorků s dvěma druhy plniva ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{TiO}_2$ ) a různými hmotnostními podíly plniva jsou na obr. 9 a obr. 10. Z obrázků je patrný pokles relativní permitivity nanokompozitních materiálů s rostoucím kmitočtem, bez ohledu na typ a koncentraci plniva. Z obrázků je dále patrné, že až do určité koncentrace nanoplňiva je permitivita nanokompozitních vzorků menší než permitivita čisté epoxidové pryskyřice v celém kmitočtovém rozsahu. Obr. 9 pro nanokompozit plněný  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ukazuje, že hodnoty relativní permitivity s 0,1%, 0,5%, a 1% podílem plniva jsou nižší než u vzorku čisté epoxidové pryskyřice. Pouze vzorek s 5% podílem plniv má hodnoty relativní permitivity vyšší než vzorek čisté epoxidové pryskyřice. Na druhou stranu, jak můžeme vidět na obr. 10, pro nanokompozit plněný  $\text{TiO}_2$ , jsou v celém kmitočtovém rozsahu nižší pouze hodnoty relativní permitivity vzorků s plněním 0,1 % oproti hodnotám relativní permitivity čisté epoxidové pryskyřice. Je zde tedy vidět vliv typu plniva. V nanokompozitu plněném  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lze pozorovat nižší permitivitu, až do 1% koncentrace plniva oproti čisté epoxidové pryskyřici, zatím co u  $\text{TiO}_2$  je stejný účinek viděn při plnění 0,1 %. Toto je nejspíše důsledkem rozdílů mezi permitivitami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{TiO}_2$ . Vzhledem v nižší hodnotě permitivity  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (přibližně 9) v porovnání s  $\text{TiO}_2$  (přibližně 100), vliv zvýšení efektivní permitivity nanoplňiva  $\text{Al}_2\text{O}_3$  byl menší ve srovnání s účinkem nanoplňiva  $\text{TiO}_2$ . Zvýšení počtu částic  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z 0,1 % na 5 % v epoxidové pryskyřici nepovede k významnému zvýšení permitivity nanokompozitu v porovnání s případem plniv  $\text{TiO}_2$ . Tento účinek potvrzuje, že závislost na permitivitě nanoplňiv je minimální při malé koncentraci a roste do hodnoty permitivity nanokompozitu, která nebude větší než u čisté epoxidové pryskyřice. Výsledek je významný, protože k dosažení materiálu s nižší efektivní permitivitou pro použití v kmitočtovém rozsahu 1 MHz až 1 GHz můžeme navrhnout materiál s nanoplňivem o velmi nízké permitivitě [21].



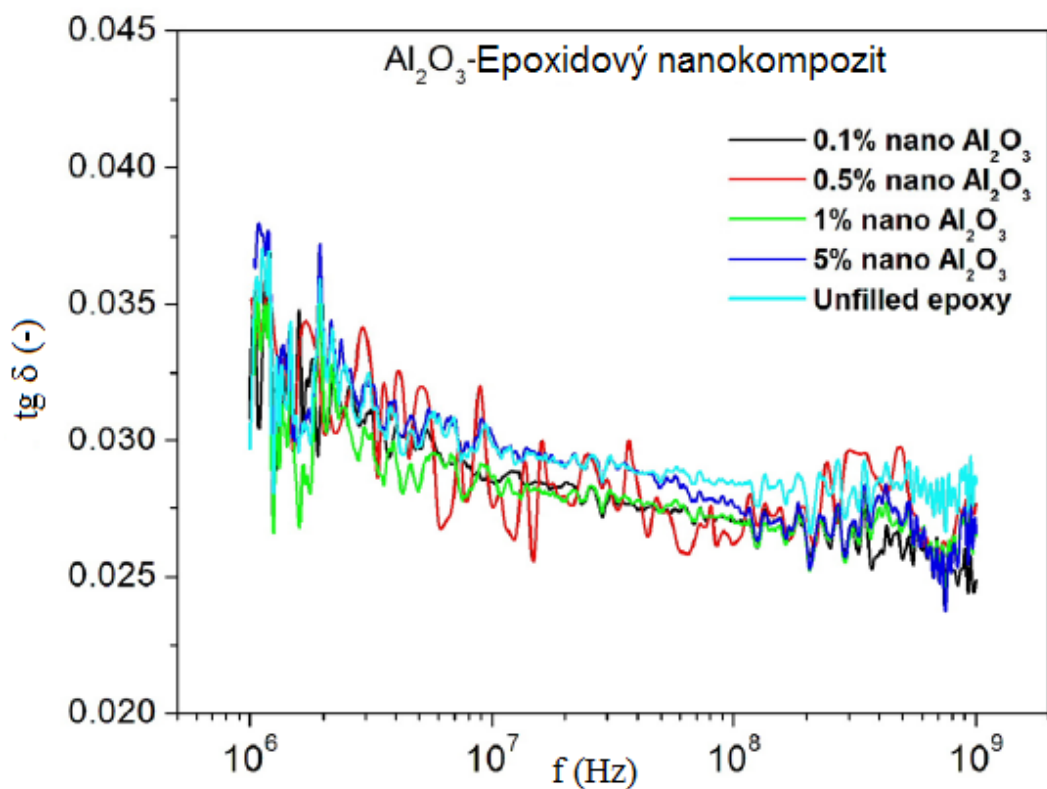
Obr. 9 Kmitočtové závislosti relativní permitivity epoxidových nanokompozitních vzorků plněných  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [21].



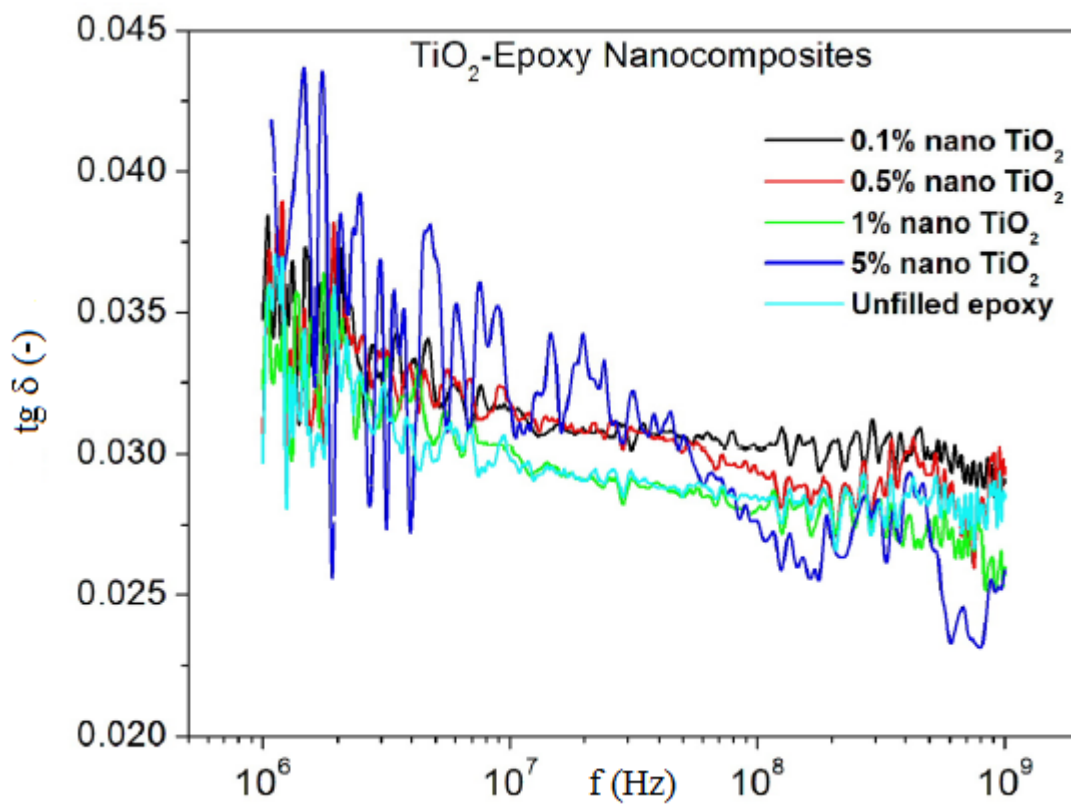
Obr. 10 Kmitočtové závislosti relativní permitivity epoxidových nanokompozitních vzorků plněných  $\text{TiO}_2$  [21].

## **Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$**

Kmitočtové závislosti ztrátového činitele epoxidových nanokompozitních vzorků s plnivou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{TiO}_2$  znázorňují obr. 11 a obr. 12. Na grafech lze vidět kolísání ztrátového činitele (obvykle během měření při vysokých kmitočtech) nanokompozitních vzorků s plnivou  $\text{TiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Bylo by vhodné zmínit, že tato kolísání hodnot ztrátového činitele by neměla být zaměněna za ztrátové vrcholy (peaky). V polymerech, nebo jejich směsích, je koeficient dielektrických ztrát funkcí elektrické vodivosti (která závisí na pohyblivosti nosičů náboje) a aplikovaného budícího kmitočtu. To můžeme vidět na obr. 11 a obr. 12, které ukazují pro oba nanokompozitní materiály plněné  $\text{TiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  okrajové (ale pokračující) snížení hodnot ztrátového činitele pro všechny druhy plniv. To je přisuzováno poklesu elektrické vodivosti v epoxidovém nanokompozitu se stoupajícím kmitočtem, který způsobuje neschopnost nosičů elektrického náboje překročit tloušťku materiálu při vysokých kmitočtech. Obr. 11 ukazuje, že v epoxidových nanokompozitech plněných  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , v oblasti nižších kmitočtů (1 až 5 MHz) nevnáší začlenění plniva příliš mnoho změn v hodnotách ztrátového činitele ve srovnání s čistou epoxidovou pryskyřicí. Ačkoliv začlenění anorganických nanoplňiv do mřížky epoxidové pryskyřice bude s největší pravděpodobností představovat větší počet zdrojů nosičů náboje, jejich dopad na hodnoty  $\text{tg } \delta$  není pozorovatelný. Se zvyšujícím se kmitočtem jsou hodnoty  $\text{tg } \delta$  pro všechny koncentrace plniv v epoxidové pryskyřici nižší v porovnání s čistou epoxidovou pryskyřicí. Ale změny ztrátového činitele, mezi nanokompozity s různým plněním, jsou zanedbatelné. Výskyt nižších hodnot ztrátového činitele v nanokompozitech může být způsoben jejich nižší měrnou elektrickou vodivostí při těchto kmitočtech. Při vysokých kmitočtech pohyb nabitých nosičů náboje přispívá k vodivosti, vyskytující se podél polymerních řetězců. Na rozdíl od výše uvedeného může být mírně odlišné chování nanokompozitů plněných  $\text{TiO}_2$  (obr. 12). Na nízkých kmitočtech jsou hodnoty  $\text{tg } \delta$  plněné epoxidové pryskyřice nepatrně vyšší, než hodnoty základního materiálu. S rostoucím kmitočtem jsou už ale pouze vyšší hodnoty  $\text{tg } \delta$  nanokompozitů s 0,1% a 0,5% plněním  $\text{TiO}_2$ . Při vysokých kmitočtech se hodnoty  $\text{tg } \delta$  snižují pro nanokompozity s 1% a 5% plněním, oproti neplněné epoxidové pryskyřici. Existují dva různé procesy, které by mohly mít vliv na chování  $\text{tg } \delta$  v nanokompozitech. První z nich je počet nabitých nosičů, které jsou k dispozici pro elektrickou vodivost. Druhý je počet rozhraní a smísení řetězců polymeru v objemu. Celkově lze říci, že zavedením nanoplňiva do epoxidové pryskyřice se výrazně nezmění hodnoty  $\text{tg } \delta$ . S oběma druhy nanoplňiv  $\text{TiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , se hodnoty  $\text{tg } \delta$  nanokompozitních vzorků pohybují v rozmezí hodnot 0,025 až 0,037. Toto chování nanokompozitů se liší od mikrokompozitů, kde se hodnoty  $\text{tg } \delta$  obvykle výrazně zvýší se zvyšujícím se podílem plniva [21].



Obr. 11 Kmitočtové závislosti ztrátového činitele epoxidových nanokompozitních vzorků plněných Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [21].



Obr. 12 Kmitočtové závislosti ztrátového činitele epoxidových nanokompozitních vzorků plněných TiO<sub>2</sub> [21].

## **Závěr**

Relativní permitivita a ztrátový činitel epoxidových nanokompozitů plněných nanočásticemi  $\text{TiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v kmitočtovém rozsahu 1 MHz až 1 GHz jsou odlišné od očekávaných průběhů v polymerním mikrokompozitu. Začlenění nanoplňiva do epoxidové matrice snižuje permitivitu nanokompozitu pro konkrétní procenta plnění ve srovnání s neplněnou epoxidovou pryskyřicí. Takové jevy nebyly nikdy pozorovány u epoxidových mikrokompozitů. Jak se očekávalo, efektivní permitivita roste s rostoucí koncentrací plniva. Snižováním efektivní permitivity nanokompozitu byla nalezena funkční závislost koncentrace plniva a permitivity plniva. Toto jedinečné chování permitivity je způsobeno omezením mobility bipolárních skupin v nanokompozitu vzájemným ovlivňováním nanočástic a polymeru. Pro vysvětlení mechanického chování nanokompozitního polymeru lze použít dvouvrstvý model, který se dobře hodí pro vysvětlení dielektrické charakteristiky permitivity sledované v tomto článku. V případě ztrátového činitele, pro oba typy nanokompozitu, změny koncentrací plniv nevyvolávají tak významné změny ztrát v celém rozsahu měřených kmitočtů. Pro epoxidové nanokompozity plněné  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , byla hodnota  $\text{tg } \delta$  v celém měřeném kmitočtovém rozsahu nižší, nebo rovna hodnotě neplněné epoxidové pryskyřice. U epoxidových nanokompozitů plněných  $\text{TiO}_2$  se hodnoty  $\text{tg } \delta$  moc neodchýlí oproti údaji u neplněné epoxidové pryskyřice. Jsou zde však patrné změny způsobené kmitočtem. Je to rozhraní epoxidová pryskyřice – plnivo, které určuje chování permitivity a ztrátového činitele v epoxidových nanokompozitech a pro pochopení mezivrstevových jevů je důležité plně pochopit tyto dva dielektrické parametry, ale také několik dalších důležitých elektrických vlastností [21].

### **1.8.3 Vyvíjené metody zpracování polymerních nanokompozitů**

Kompozitní materiály se skládají nejméně ze dvou různých druhů fází materiálů, díky tomu mají rozhraní, na kterém se oba vzájemně dotýkají. Pro vytvoření stabilního kompozitního systému je nezbytné zvýšit kompatibilitu a v co největší míře odstranit vzájemné povrchové napětí (pnutí) mezi těmito materiály. Nanokompozitní materiály obsahují nanočástice, které jsou rozptýlené s mezerami v řádech nanometrů, a to i přes svůj nízký podíl. Celkový povrch těchto nanočástic je obrovský. Proto je pro výrobu nanokompozitních materiálů nutné vytvářet stabilní systém bez shluků a separace fází. Existuje několik metod pro přípravu nanokompozitních materiálů, jako je například metoda interkalace, sol-gel metoda, metoda formování molekulárních kompozitů a metoda přímého rozptýlení nanoplňiv [24].

## **Metody přípravy polymerních nanokompozitů:**

1. Interkalační metody
  - polymerová nebo pre-polymerová interkalační metoda
  - in-situ interkalární polymerace
  - tavná interkalace
2. Sol gel metoda
3. Metoda formování molekulárních kompozitů
  - metoda formování slitin tekutého krystalu polymeru
4. Metoda přímého rozptýlení nanoplňiv
5. Další metody.

Rozhraní mezi oběma fázemi jsou určitými způsoby modifikovány tak, aby tvořili stabilní systémy. Obecně platí, že pnutí na rozhraní musí být nižší než  $10^4 \text{ N m}^{-1}$  pro polymerové slitiny s fázovou separací v řádu mikrometrů, a pod  $5 \cdot 10^4 \text{ N m}^{-1}$  pro polymerové kompozity s velikostí výplně v řádu mikrometrů. V případě nanokompozitů by měly být tyto hodnoty mnohem nižší.

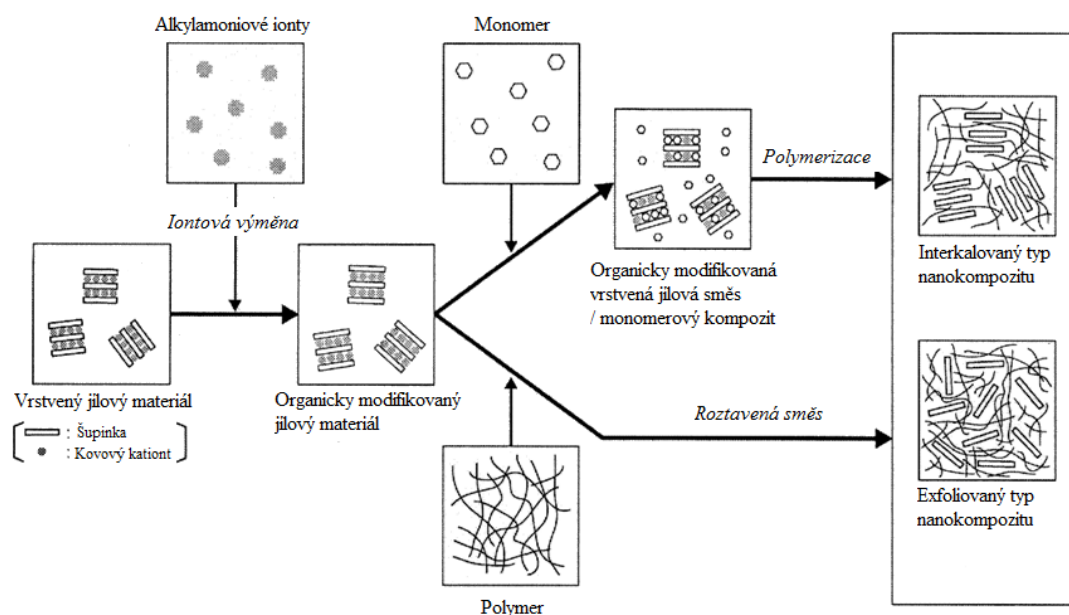
V současné době je jednou z hlavních metod pro výrobu polymerních nanokompozitů metoda exfoliace vrstev a interkalace. K jejímu provedení jsou dnes k dispozici dva procesy, a to polymerační a proces tavné směsi „melt compound“. Polymerační proces byl představen veřejnosti v roce 1987 a od té doby je preferovaným procesem. Proces tavné směsi se ale pro tento druh nanokompozitů zdá být obvyklejší, protože potřebné vybavení stojí méně a je flexibilnější při používání. Dnes přitahuje mnohem větší pozornost Sol-gel metoda, protože by mohla být snadno upravena tak, aby vyhovovala použití v průmyslové výrobě. Molekulární kompozity se vyrábějí metodou opětovného srážení roztoku a metodou tavné směsi. Druhá z metod je v tomto výrobním procesu novou a očekává se její vzestup ve vývoji a použití. Pro realizaci průmyslové výrobní linky molekulárních kompozitů, je nutné vyvinout nanometrová tekutá krystalová polyesterová vlákna [24].

### ***Interkalační metoda***

Interkalační metoda je pro výrobu polymerních nanokompozitů nejoblíbenější. Jedná se o metodu, při níž se interkalují monomery nebo polymery mezi vrstvy anorganických vrstvených látek a tím se rozptýlí do polymerů v průběhu procesu polymerace, nebo tavné směsi „melt compound“, pomocí exfoliace vrstvených látek vrstvu po vrstvě. V této metodě jsou často používány vrstvené křemičitaný, jak je znázorněno na obr. 13.

V této kategorii existují tři metody. První z těchto metod je interkalace polymerů nebo pre-polymerů z roztoku. Metoda je založena na systému, ve kterém se pomocí rozpouštědla rozpustí polymer nebo pre-polymer a křemičitanové vrstvy jsou absorpční. Vrstvený křemičitan je nejprve ponořen v rozpouštědle, jako je voda, chloroform nebo toluen. V okamžiku, kdy se polymer a roztoky vrstvených křemičitanů smíchají, polymerové řetězce

interkalují a vytlačují rozpouštědlo z mezivrstvy křemičitanu. Po odstranění rozpouštědla interkalovaná struktura zůstává a vzniká tak polymerový, křemičitanem vrstvený, nanokompozit. Ve druhé interkalační metodě in-situ je vrstvený křemičitan ponořen do tekutého monomeru nebo monomerového roztoku tak, aby mohlo dojít k polymerní formaci mezi interkalovanými vrstvami. Polymerace je iniciována, buď teplem, organickým iniciátorem, nebo katalyzátorem, prostřednictvím kationtů uvnitř mezivrstvy před ponořením. Poslední metodou je tavná interkalace zahrnující žíhání a míchání směsi polymeru a organicky modifikovaného vrstveného křemičitanu nad bodem měknutí polymeru. Tato metoda má velké výhody oproti předchozím metodám, interkalační metodě in-situ a metodě interkalace polymerovým roztokem. První výhodou je ekologická šetrnost vzhledem k absenci organických rozpouštědel, druhou výhodou je kompatibilita se současnými průmyslovými procesy, jako jsou vytlačování (lisování) a vstřikování. Poslední výhodou je možnost využití při výrobě polymerů, které nejsou vhodné pro předchozí dvě metody [24].

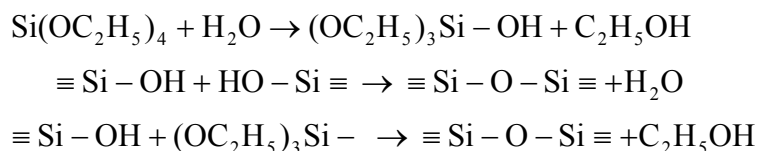


Obr. 13 Proces interkalace a exfoliace polymerních nanokompozitů [24].

### **Sol gel metoda**

Metoda se vyznačuje tím, že anorganické nebo kompozitní organicko-anorganické materiály jsou vyráběny při relativně nízkých teplotách. Princip této metody spočívá v hydrolyze molekulárních prekurzorů a následné polykondenzaci do sklovité formy. To umožňuje během procesu vzniku skelné sítě vzájemné zapracování (smíchání) organických a anorganických aditiv za pokojové teploty. Tato metoda je tradičně využívána pro výrobu skla a keramiky. V poslední době se také používá pro výrobu polykrystalů, pórovitých kompozitů a organicko-anorganických kompozitů. Sol-gel reakce je zahájena z metalalkoxidu,  $M(OR)_n$ . Měl by být rozpuštěn ve vodě, alkoholu, kyselině, amoniaku nebo

v podobných látkách, aby došlo k rovnoměrnému rozptýlení. Metalalkoxid je hydrolyzován reakcí s vodou na metalhydroxid a alkohol. Existuje mnoho druhů kovů, které se k tomu používají, například Na, Ba, Cu, Al, Si, Ti, Zr, Ge, V, W a Y. Používají se také křemíkové alkoxidy, jako tetraethoxysilan (TEOS) a tetramethoxysilan (MTEOS). V případě TEOS je polymerační reakcí, následovanou hydrolyzou, vytvořen amorfní krystal s trojrozměrnou sítí křemíkových struktur [24].



Sol-gel metoda nebyla považována za vhodnou pro hromadnou výrobu, protože používala vodu jako médium. Nicméně se dnes očekává, že se stane v blízké budoucnosti klíčovou technologií, díky nedávno vyvinutým modifikovaným metodám, jako je například spojitá sol-gel metoda. Některé společnosti představily vysoce funkční organosoly kyseliny křemíku, vyrobené buď sol-gel kondenzací tetraethoxsilanu nebo acidifikací sodíkových křemičitanů následovanou funkcionalizací s různými trisalkoxysilany. Dalším krokem je průmyslová příprava rozptylovatelných boehmitových nanovýplní [24].

### ***Metoda formování molekulárních kompozitů***

Molekulární kompozit je materiální systém, v němž je dosaženo zpevnění pomocí molekulárních tyčinek. Tato metoda byla původně charakterizována tím, že tuhý polymer, jako například tekutý krystal polyesteru (LCP), byl rozptýlen ve flexibilní polymerní mřížce o velikosti molekul a mikrovláken. Metoda byla v minulosti realizována rozpuštěním dvou druhů materiálů v rozpouštědle a následným vytvoření sraženiny. Tato metoda nebyla vyvinuta pro hromadnou výrobu. Nová metoda byla vyvinuta v roce 1990 a pracuje na principu smíchání roztavené směsi průmyslových plastů s malým množstvím tekutého krystalického polyesteru (LCP). Ukázalo se, že pomocí této metody je možné vyrobit kompozity s výbornými vlastnostmi, a proto jí byla věnována značná pozornost [22]. Typickými příklady tohoto typu výroby jsou polyamidy, polyfenylestery, polyetylentereftaláty a polykarbonáty se všemi aromatickými polyestery. Je třeba poznamenat, že potřebují třetí látku, která umožní reakci proběhnout. Tato třetí látka podporuje tvorbu vláken a rozptyluje je v kompozitech. Molekulární kompozity mají lepší mechanické vlastnosti než materiál původní. V tomto případě se používají mikrovlákna o velikostech 500 nm. Pro realizaci tohoto typu nanokompozitu je nutné dosáhnout o jeden řád menší rozptylovací fáze [24].

## **Metoda přímého rozptýlení nanoplňiv**

U této metody jsou nanočástice na povrchu chemicky modifikovány tak, aby došlo ke zvýšení jejich kompatibility s polymery, se kterými jsou následně smíchány a rovnoměrně rozptýleny bez tvorby shluků. Existuje několik příkladů, jako jsou foto-činnidla lakování s modifikovanými křemennými nanočásticemi, nanočásticová pasta ze zlata nebo stříbra, chráněná zábranou z kopolymerů ve tvaru hřebenu, nanokompozit s křemennými nanočásticemi s povrchem zušlechťeným aminobutyrickou kyselinou [24].

### **1.9 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 mnohasložkovou 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 (7):

$$X_s = F(X_1, X_2, \dots, X_n, v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (7)$$

Přičemž platí:

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (8)$$

V konkrétních případech bývá funkční závislost (7) 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 [14].

#### **1.9.1 Permittivita složené soustavy**

Nejčastěji řešené jsou složené 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  $\varepsilon'_2$  a dispergovanými částicemi kulového tvaru o permitivitě  $\varepsilon'_1$ . Při odvození zevšeobecněného vztahu se uvažuje, že každá dispergovaná částice je obklopena prostředím o efektivní permitivitě  $\varepsilon'_{ef} = \langle \varepsilon'_2 ; \varepsilon'_s \rangle$ .

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  $\varepsilon'_s$  výrazem:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon'_2 \left[ 1 + v_1 \left( \frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} - 1 \right) \frac{3\varepsilon'_{ef}}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_{ef}} \right]. \quad (9)$$

Vztah (9) lze považovat za všeobecný směsný vztah a je ho možné převést do tvaru:

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

Výpočet permitivity  $\varepsilon'_s$  dosazením  $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_2$  nebo  $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_s$  do rovnice (10) 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:

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

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

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_s} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_s} \quad (12)$$

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

$$\varepsilon_s'^k = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i'^k, \quad (13)$$

kteřý nabývá pro dvousložkové soustavy tvaru

$$\varepsilon_s'^k = v_1 \varepsilon_1'^k + v_2 \varepsilon_2'^k \quad (14)$$

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 (14) vztahům (15) a (16):

$$\varepsilon'_s = v_1 \varepsilon'_1 + v_2 \varepsilon'_2 \quad (15)$$

$$\frac{1}{\varepsilon'_s} = v_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + v_2 \frac{1}{\varepsilon'_2}, \quad (16)$$

kteří 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:

$$\log \varepsilon'_s = v_1 \log \varepsilon'_1 + v_2 \log \varepsilon'_2, \quad (17)$$

kteří 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 (17). Při odvozování (svých) vztahů uvažoval Lichtenecker dvě složky o nejvyšším poměru  $\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} = 4$  [14].

### **1.10 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 jejich neaktivní složky. Po odstranění rozpouštědel a ředidel vytvářejí tzv. filmotvorné složky lakový film. Obsah filmotvorných složek v lacích určuje sušina.

Velmi důležitou vlastností elektroizolačních laků je viskozita. Ta závisí na obsahu filmotvorných složek, molekulové hmotnosti, struktuře, povaze molekul a 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 filmotvorné 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 [14].

### **1.10.1 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).

### **1.11 Slída a její druhy**

Slída je pro své výborné vlastnosti, dané její strukturou, v níž 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.

**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 [16].

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.

### 1.12 Navlhavost materiálů

Navlhavost (hydropskopičnost) je schopnost látky přijímat vlhkost z okolního ovzduší (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.

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. Adsorpce molekul vody je důsledkem působení adsorpčních sil mezi sorbentem a sorbendem, tedy mezi látkou přijímající vodní páru (plyn) a sorbovanou látkou. Při adsorpci molekul se mohou uplatnit elektrostatické síly, van der Waalsovy síly a chemické síly [23].

### 1.13 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.

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

$$\phi = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} \quad (18)$$

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:

$$\phi_m = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{vp}}} \quad (19)$$

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

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

$$s = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{sp}}} \quad (20)$$

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

**Relativní vlhkost**  $\varphi$  – (označovaná 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:

$$\varphi = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}} \quad (21)$$

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 (18) 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:

$$\varphi = \frac{\phi}{\phi_{\text{nas}}} \quad (22)$$

kde  $\phi$  je skutečná absolutní vlhkost plynu a  $\phi_{\text{nas}}$  je absolutní vlhkost vzduchu při nasycení vodní parou [23].

### **1.14 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 rychlejšímu stárnutí a trvalému zhoršení jeho základních vlastností. Obecně tepelné vlastnosti lakových kompozitních materiálů závisí na typu použité pryskyřice.

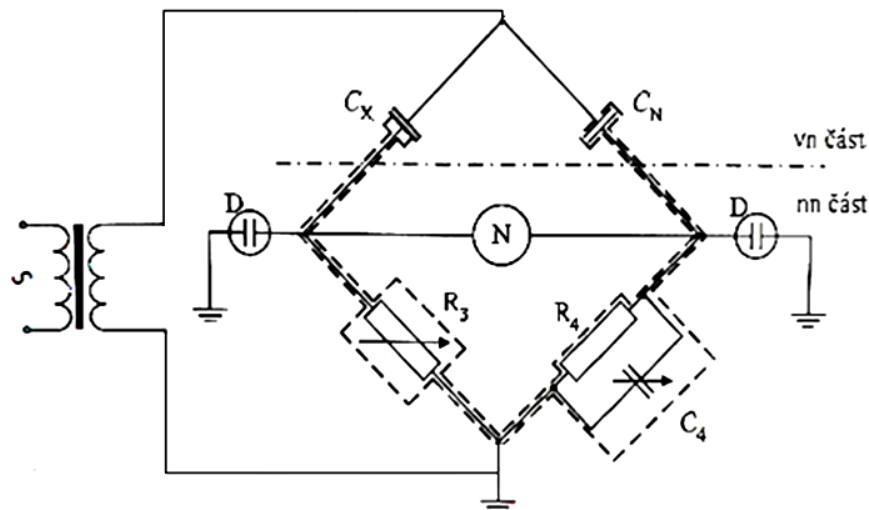
## **1.15 Diagnostické metody pro sledování elektrických vlastností izolačních materiálů ve střídavém poli**

Elektrické zařízení je sériovým spolehlivostním řetězcem, v němž výpadek jednoho článku znamená ukončení činnosti celku. Při zkoumání stavu zařízení zaměřujeme pozornost na jeho nejcitlivější místo, kterým je bezesporu izolační systém. To znamená věnovat patřičnou pozornost izolantům, jak při vstupu do výroby, tak i v jejím průběhu a následném běhu života zařízení. Toto studium je záležitostí diagnostiky elektrických zařízení. Naše pozornost bude věnována diagnostice prvků dielektrického pod systému elektrického zařízení – izolantům, ve střídavém elektrickém poli. Principem měřících metod v této oblasti je určení prvků náhradního schématu dielektrika. Pro získání objektivního obrazu v této oblasti je vhodné sledovat závislosti ztrátového činitele  $\operatorname{tg} \delta$  a relativní permitivity  $\varepsilon'$  na napětí, teplotě a kmitočtu, jak ostatně vyplývá z teoretických úvah a je podpořeno praktickými zkušenostmi. Dalším rozhodujícím faktorem v této oblasti je kmitočtová závislost těchto parametrů. To znamená, že musíme podle daného kmitočtu používat různé metody. Pro získání objektivního názoru na možnosti aplikace daného materiálu při určitém kmitočtu, se musíme přesvědčit, jak se při něm z tohoto hlediska chová.

Pro praktická měření v oblasti průmyslové a jí blízkých kmitočtech používáme metody můstkové, pro vyšší kmitočty řádově nad desítky kHz pak metodu rezonanční [16].

### **1.15.1 Metoda Scheringova můstku**

Jednou z nejpoužívanějších je metoda Scheringova můstku. Můstek sestává ze dvou hlavních částí, z první, jejíž prvky jsou umístěny ve vysokonapětovém prostoru zkušebny a dále části sloužící k vyvažování mimo tento prostor. Galvanické oddělení obou částí tvoří vzorek v příslušném elektrodoovém systému a kapacitní normál, který je ve vysokonapětové části můstku proveden jako vysokonapětový kondenzátor, většinou o kapacitě cca 100 pF, se zanedbatelnými ztrátami  $\operatorname{tg} \delta < 10^{-5}$  a plynným dielektrikem, nejčastěji v podobě stlačeného oxidu uhličitého.



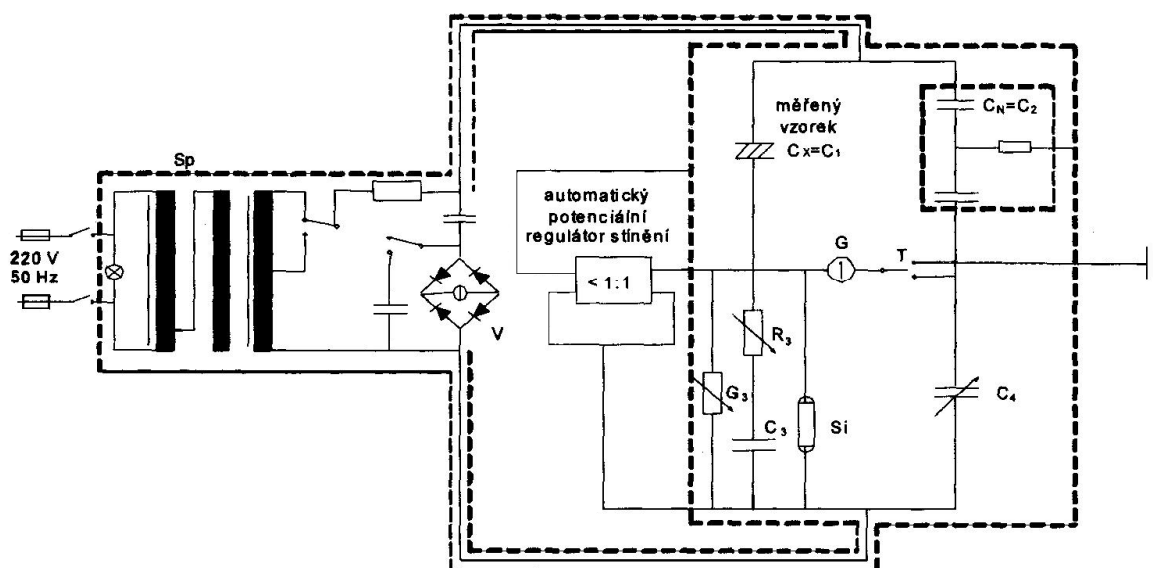
Obr. 14 Scheringův vysokonapět'ový můstek [16].

Použitý napět'ový zdroj musí dávat napětí sinusového průběhu a mít dostatečný výkon. Nesmí být v oblasti používaného zkušebního napětí zdrojem výbojové činnosti. V uzlech diagonální větve můstku jsou svodiče přepětí D, sloužící k ochraně obsluhy při případném průrazu vzorku. Nízkonapět'ová část slouží k vyvážení můstku odporovou a kapacitní dekádou  $R_3$  a  $C_4$ . Dekádou  $R_3$  se vyrovnává kapacitní složka náhradního sériového obvodu, kapacita  $C_4$  slouží k vyrovnání odporové složky. Vyrovnání indikuje nulový indikátor N. Nízkonapět'ová část můstku je stíněna proti vlivu elektromagnetických parazitních polí, jež ovlivňují přesnost měření.

Před vlastním vyvážením můstku je nutné eliminovat parazitní kapacity potenciálním regulátorem stínění. Jeho posláním je generace a zavedení potenciálu opačné polarity i fáze do stínícího obvodu můstku a tím likvidace rušivých potenciálů, vzniklých díky okolním rušivým polím a vazbou prvků můstku proti zemi [16].

### 1.15.2 Metoda čtyřkapacitního můstku

Schéma čtyřkapacitního můstku je vidět na obr. 15. Tento můstek se odlišuje od výše uvedeného Scheringova můstku tím, že má ve všech větvích kapacity, tedy i ve třetí a čtvrté, což má za následek zvýšenou impedanci v uvedených větvích a tím vyšší citlivost i přesnost měření. Můstek má vlastní zabudovaný napájecí zdroj, který pracuje v rezonančním zapojení a zaručuje sinusový tvar křivky 50 Hz bez vyšších harmonických. Umožňuje práci s napětím do 2 000 V.



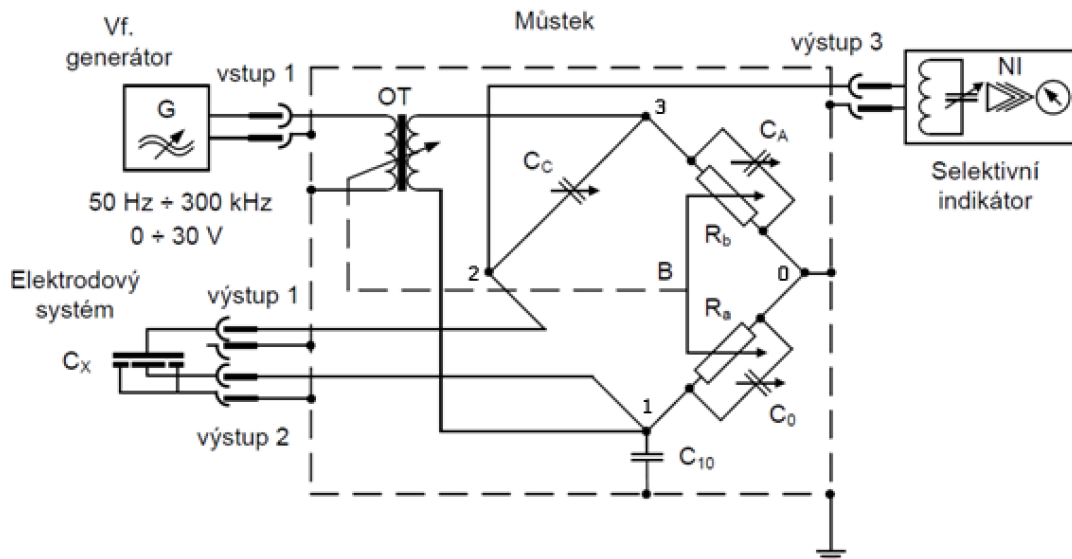
Obr. 15 Zapojení čtyřkapacitního Scheringova můstku [16].

Pro eliminaci parazitních kapacit přívodů a měrných kondenzátorů, které by znehodnocovaly měření, je můstek vybaven stíněním a vestavěným automatickým potenciálním regulátorem P. Jedná se o zesilovač  $1:1$  s velkou vstupní a malou výstupní impedancí, který při vyrovnání můstku přivádí automaticky jeden uzel diagonály na nulový potenciál a tím eliminuje vliv kapacity přívodů k uzlům můstku proti stínění, tedy zemi. Vyrovnání můstku se děje pomocí elektronického nulového indikátoru s regulovatelnou citlivostí. Neznámá kapacita  $C_x$  vzorku zapojená do první větve můstku se vyrovnává kapacitní dekádou  $C_4$ . Ztráty vzorku pak odporovou a vodivostní dekádou  $R_3$  a  $G_3$  ve třetí můstkové větvi. Velikost  $\text{tg } \delta$  se čte přímo na stupnicích ovládacích prvků můstku [16].

### 1.15.3 Metoda modifikovaného můstku pro rozsah 30 Hz do 300 kHz.

Pro měření dielektrických ztrát v kmitočtovém spektru 30 Hz až 300 kHz slouží modifikovaný Scheringův můstek podle zapojení na obr. 16.

Můstek je napájen v neuzemněné diagonále 1 - 3 napětím proměnné amplitudy a kmitočtu (0 až 30 V, 30 Hz až 300 kHz) z oscilátoru přes oddělovací transformátor. V uzemněné diagonále 2 - 4 je selektivní laditelný zesilovač s indikátorem jako nulový indikátor. Do větve 1 - 2 je koaxiálními kabely připojen měrný kondenzátor se vzorkem.

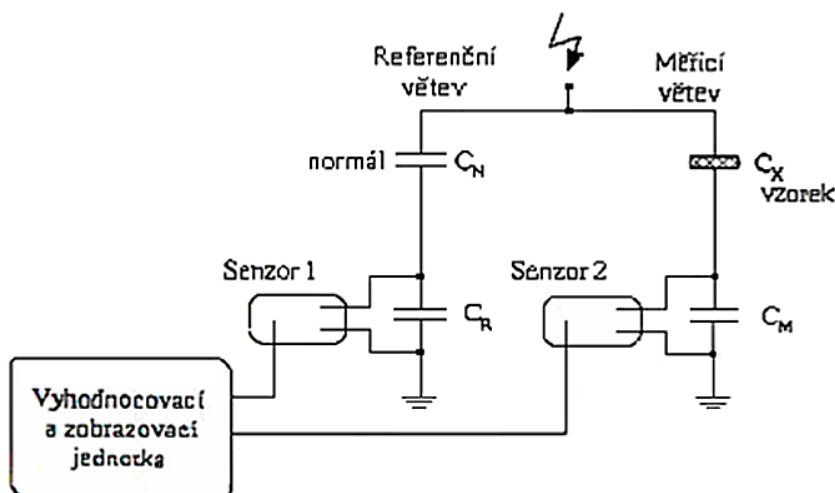


Obr. 16 Modifikovaný Scheringův můstek pro kmitočty 30 Hz až 300kHz [16].

Otočným kondenzátorem ve větvi 2 - 3 se vyrovnává kapacita vzorku. Hrubé rozsahy této kapacity  $\times 1$ ,  $\times 10$ ,  $\times 100$ ,  $\times 1000$  lze nastavit na můstku přepínačem B. Ztrátový činitel vzorku se vyrovnává otočným kondenzátorem  $C_A$  (na můstku označen A) ve větvi 0 - 3 a nastavením poměru odporů  $R_a$  a  $R_b$  ve větvích 0 - 3 a 0 - 1 přepínačem na můstku B (podobně jako u hrubých rozsahů kondenzátoru větve 2 - 3) [16].

#### 1.15.4 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát

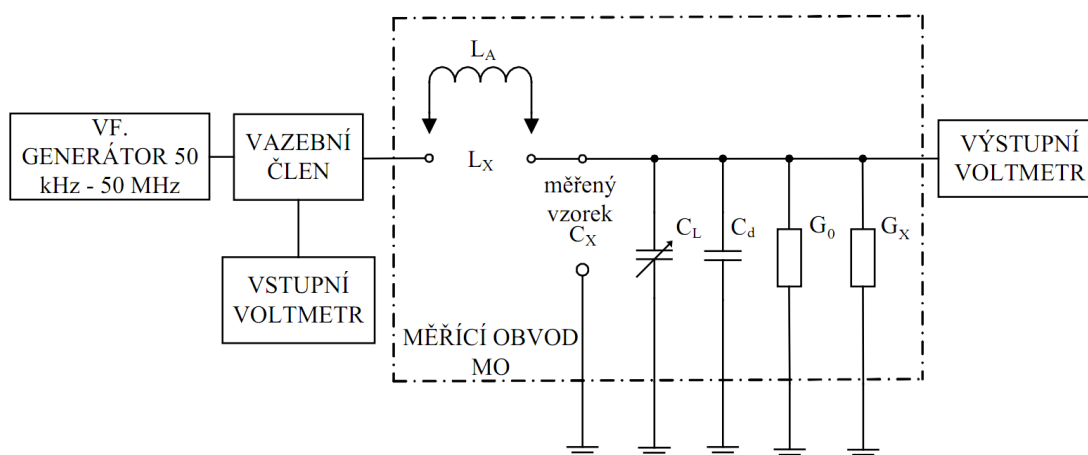
Můstek vychází z klasického principu Scheringova můstku a slouží k automatickému zobrazení  $\text{tg } \delta$  a  $C_x$ . Můstek je zobrazen na obr. 17. Větve můstku jsou vlastně kapacitními děliči (vysokonapěťové kapacity  $C_x$  a  $C_N$ , nízkonapěťové  $C_M$  a  $C_R$ ). Tento můstek nemusí být oproti konvenčním můstkům úplně vyvážen, neboť se vlastně měří fázový úhel mezi dílčími napětími na obou nízkonapěťových impedancích. Oba nízkonapěťové kondenzátory  $C_M$  a  $C_R$  jsou hrubě nastaveny tak, že dělicí poměry větví jsou stejného řádu. Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  se určuje z fázového úhlu mezi napětími, která se objeví na nízkonapěťových kondenzátorech  $C_M$  a  $C_R$ . Tato napětí jsou digitalizována senzory 1 a 2 s bateriovým napájením. Digitalizované signály jsou přenášeny optickými kabely do počítače, kde jsou zpracovány s použitím rychlé Fourierovy transformace a následně je určen  $\text{tg } \delta$ . Kapacita  $C_x$  se určuje z dělicího poměru měřicí větve. Výhodou můstku je použití nejen odporů, ale i kondenzátorů v nízkonapěťové části můstku, což zpřesňuje měření, ale také umožňuje eliminaci chyb vzniklých příčnými parazitními kapacitami [16].



Obr. 17 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát [16].

### 1.15.5 Rezonanční metoda měřením nakmitaného napětí (Q-metr)

Tato rezonanční metoda se používá v kmitočtovém rozsahu 10 kHz až stovky MHz. Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  se zde určuje na základě rozdílu činitele jakosti rezonančního obvodu  $Q$  s připojeným a bez připojeného vzorku. Používaným přístrojem je Q-metr, tedy přístroj pro měření obecných impedancí v uvedeném rozsahu. Měření se děje na základě zjišťování činitele jakosti, tedy podílu nakmitaného napětí na reaktanci obvodu a vstupního napětí vložené energie do rezonančního obvodu ze zdroje. Měřenou impedancí je proměřované dielektrikum v měrném kondenzátoru, zapojené do měrného sériového rezonančního obvodu. Schéma Q-metru s proměřovaným dielektrikem je na obr. 18.



Obr. 18 Schéma rezonanční metody (Q metr) pro měření  $\text{tg } \delta$  [16].

Na obr. 18 jsou  $L_a$  pomocné cívky takové hodnoty, aby docházelo k rezonanci pro daný nastavený kmitočet,  $C_A$  je kapacita laditelného kondenzátoru  $C_L$  nastavená při rezonanci obvodu s měřeným vzorkem,  $C_d$  je kapacita mikrometrického kondenzátoru s dielektrikem ve

formě vzduchu,  $G_0$  je konduktance samotného vzduchového kondenzátoru a  $G_x$  je konduktance dielektrika.

Měřicí rezonanční obvod MO je napájen přes vazební člen vysokofrekvenčním generátorem, jehož napětí je měřeno vstupním voltmetrem. Vazebním členem je v podstatě odporový dělič. Měrný obvod MO je sériový rezonanční obvod, tvořený měrným laditelným kondenzátorem  $C_L$ , v sérii se svorkami  $L_x$ , kam připojujeme při měření ztrátového činitele pomocnou cívku takové hodnoty, aby rezonovala při daném kmitočtu. Na svorky  $C_x$  připojíme paralelně k laditelnému kondenzátoru  $C_L$  mikrometrický měrný kondenzátor s proměřovaným dielektrikem. Nakmitané napětí měříme na kondenzátoru rezonančního obvodu výstupním voltmetrem. Mikrometrický měrný kondenzátor má pevnou spodní a výkyvnou horní elektrodu posouvateľnou mikrometrickým šroubem. Její výkyvné uložení umožňuje kopírování eventuálních nerovnoběžností ploch vzorku.

Principem měření je substituční měření ztrát kondenzátoru  $C_d$  na základě měření činitele jakosti  $Q$  obvodu v rezonanci. Měření ztrátového činitele se děje měřením činitele jakosti obvodu s připojeným vzorkem dielektrika (první měření) a bez vzorku (druhé měření). Při prvním měření se změří  $Q_1$  při vzdálenosti elektrod mikrometrického kondenzátoru  $d_1$ , která je tloušťkou vzorku. Při druhém měření, prováděném bez měřeného vzorku, který byl z elektrodového systému vyňat, se změří  $Q_2$  a zmenšená vzdálenost elektrod  $d_2$ , při níž se obvod rozkmitá do rezonance [16].

## 2 Experimentální část

### 2.1 Zkušební vzorky

Pro účely proměření a vyhodnocení vlivu klimatických podmínek, zejména teploty a relativní vlhkosti, na složky komplexní permitivity složených lakových materiálů s ohledem na podíl plniva, byla připravena sada vzorků vyrobených z epoxidového impregnačního laku Epoxylite TSA 220S plněného různým podílem mikromleté slídy jako plniva. 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 vzorků obsahovala 4%, třetí 8% a čtvrtá 12% podíl mikromleté slídy, viz tab. 4.

Pro účely porovnání vlastností elektroizolačního laku plněného nanočásticemi a mikročásticemi za normálních atmosférických podmínek byla zhotovena sada vzorků z polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102 plněné různými podíly mikromleté slídy a oxidu křemičitého v podobě nanoplňiva. Vzorků plněných nanočásticemi oxidu křemičitého byly vyrobeny čtyři sady po třech vzorcích, kde se každá sada lišila obsahem oxidu křemičitého jako plniva. První sada je vyrobena pouze z čistého laku bez oxidu křemičitého, druhá obsahovala 1%, třetí 2% a čtvrtá 3% podíl oxidu křemičitého, viz tab. 6. Vzorků plněných mikročásticemi v podobě slídy byly vyrobeny také čtyři sady po třech vzorcích. První sada vzorků obsahovala 2%, druhá 4%, třetí 6% a čtvrtá 8% podíl mikromleté slídy, viz tab. 5.

#### 2.1.1 Impregnační laky

##### **Charakteristika polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102**

Zkušební vzorky plněné nanočásticemi a mikročásticemi byly vyrobeny z vysoce kvalitní polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102 třídy H. Jedná se o jednosložkovou čirou polyesterovou pryskyřici se 100 % pevných částic. Je charakteristická svoji vynikající smáčecí schopností, dobrou lepidlostí, středně nízkou viskozitou, velice slabým aroma a relativně rychlým vytvrzovacím cyklem. Výhodou této pryskyřice je to, že neobsahuje formaldehyd, styren, vinyltolen a tri-methyl-benzen. Dolphon XL 2102 je vhodný pro impregnaci trakčních vinutí, rotorů, statorů a transformátorů. Výrobce stanovené doby vytvrzování jsou 2,5 hodiny při teplotě 150 °C, 2 hodiny při teplotě 160 °C, nebo 1,25 hodiny při teplotě 170 °C [10].

Tab. 2 Vlastnosti polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102 [10].

|                      |   |                           |
|----------------------|---|---------------------------|
| Hustota při 25 °C    | 1050 ± 50 kg m <sup>-3</sup>                |                           |
| Doba želatiny        | s 1 % reakčního činidla 198 D               | 100 °C 8 - 12 min.        |
|                      | se 2 % reakčního činidla 198 D              | 100 °C 6 - 9 min.         |
| Váhový úbytek        | 15 g pryskyřice, od 100 do 140 °C na 20min. | < 1,3 %                   |
| Dielektrická pevnost | ASTM D – 115, 23 °C                         | > 128 kV mm <sup>-1</sup> |

### **Charakteristika epoxidové pryskyřice Epoxylite TSA 220S**

Sada zkušebních vzorků, určená pro vyhodnocení vlivu klimatických podmínek, plněných mikročásticemi, je vyrobena z epoxidového impregnačního laku Epoxylite TSA 220S jako matrice. 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 gelování, udávaná výrobcem, je 6 minut, po 12 hodinách je lak zcela vytvrzen.

Tab. 3: Vlastnosti tvrzené pryskyřice [5].

|                                   |                      |  |
|-----------------------------------|----------------------|--|
| Tvrdość D podle Shorea            | (DIN 53505)          | 92 (25 °C)                             |
| Tepelná třída                     | (ASTM D1207/20000 h) | 220 °C                                 |
| Teplota zesklenní                 | (IEC 1006)           | 150 °C                                 |
| Pevnost v tahu                    | (ISO 527)            | 110 N mm <sup>-2</sup>                 |
| Poměrné prodloužení při přetržení | (ISO 527)            | 2,50 %                                 |
| Součinitel tepelné roztažnosti    | (DIN 53752)          | 50.10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>    |
| Tepelná vodivost                  | (ISO 8894-1)         | 0,21 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| Zápalnost                         | (UL 94)              | ----                                   |
| Absorpce vody                     | (ISO 62)             | 0,12% (23 °C)                          |
| Dielektrická pevnost              | (IEC 243-1)          | 260 kVcm <sup>-1</sup>                 |
| 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                              |

#### **2.1.2 Plniva**

##### **Charakteristika oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>)**

Vzorky plněné nanočásticemi obsahují podíl oxidu křemičitého ve formě nanoprášku od firmy Sigma-Aldrich o velikosti částic 10 - 20 nm s čistotou 99,5 %. Povrch částic je 140 - 180 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> s hustotou 2,2 - 2,6 g cm<sup>-3</sup>. Oxid křemičitý se v přírodě nalézá nejčastěji ve formě α-křemene, který je součástí například žuly a pískovce. Oxid křemičitý je velmi rozmanitý, tvoří nejméně 22 fází a 12 polymorfních forem. Díky tomu a velkému praktickému významu

patří tento oxid k nejstudovanějším látkám. Modifikace oxidu křemičitého se převážně skládají z tetraedrů  $\text{SiO}_4$ , které jsou propojeny přes vrchol. V termodynamicky nejstabilnější formě -  $\alpha$ -křemenu tvoří tyto tetraedry vzájemně spojené šroubovice. Oxid křemičitý je velmi odolný vůči kyselinám, s výjimkou kyseliny fluorovodíkové. V průmyslu se nejčastěji používá  $\alpha$ -křemen, křemenné sklo, silikagel, kouřový křemen a diatomit [20].

### **Charakteristika slídy**

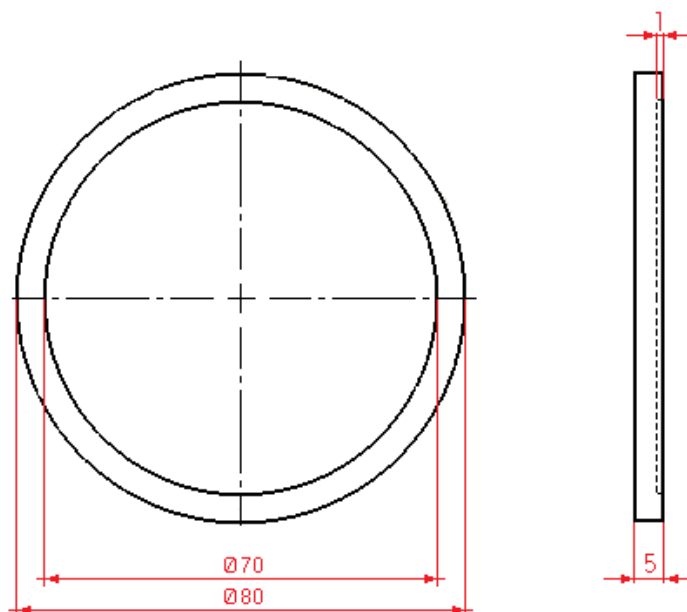
Sada vzorků obsahujících mikročástice je plněna hmotnostními podíly mikromleté slídy firmy Mica-M. Jedná se o nerostnou surovinu vyrobenou mletím slídy nebo slídových odpadů na částice menší než 15  $\mu\text{m}$ . Tato slída neobsahuje žádné vodivé částice.

### **2.1.3 Výroba lakových vzorků**

Vzorky tvořené epoxidovým impregnačním lakem Epoxylite TSA 220S, plněným různým podílem mikromleté slídy jako plniva, byly vytvrzovány v teflonových (polytetrafluorethylénových) formách. Teflon je termoplast a má dobrou tepelnou stabilitu. Vytvrzené vzorky neobsahovaly žádné vzduchové vměstky a byly vhodné k vlastnímu měření.

Pro výrobu vzorků z polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102 s různým plněním mikromleté slídy, nebo částicemi  $\text{SiO}_2$  v podobě nanoplňiva, byly po neúspěšných pokusech výroby v teflonových formách zvoleny pro tento typ laku formy hliníkové. Důvodem bylo opakované praskání a prohýbání vzorků za současného vytváření vzduchových vměstků ve vzorcích, které tím byly znehodnoceny a nebyly použitelné k vlastnímu měření. Vzduchové vměstky představují mezi vytvrzeným vzorkem a elektrodovým systémem sériově připojenou kapacitu vzduchového kondenzátoru ke kondenzátoru, tvořeném vytvrzeným lakovým vzorkem. To způsobuje zmenšení měřené kapacity a tedy snížení hodnot relativní permitivity. Důvod tohoto praskání vzorků a vytváření vzduchových vměstků mohl být v tom, že je polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102 určena pro aplikace na povrchy vodičů a dílů s malou tloušťkou nanášené vrstvy laku (do 2 mm), zatímco hloubka vnitřní vysoustružené části teflonových forem se pohybovala od 2,5 mm do 5,5 mm.

Na obr. 19 je zobrazena hliníková forma s vnějším průměrem  $d_1 = 80$  mm a vnitřním průměrem  $d_2 = 70$  mm. Tloušťka formy je  $h_1 = 5$  mm. Hloubka vnitřní vysoustružené části formy činí  $h_2 = 1$  mm.



Obr. 19 Rozměry hliníkových forem pro odlévání vzorků [17].

### **Postup samotné výroby vzorků**

Po výpočtu objemu použitých forem, hmotnosti elektroizolačního laku a hmotnostního podílu plniva v podobě oxidu křemičitého nebo slídy, byl v kádince na laboratorní váze navážen daný podíl plniva a elektroizolačního laku. Směs bylo nutné důkladně promíchat, aby v ní nevznikly shluky (hrudky) použitého plniva. Směs byla nejprve míchána magnetickou míchačkou po dobu 20 minut při teplotě 30 °C kvůli snížení viskozity směsi. Po té bylo použito ultrazvukového míchání pro ještě důkladnější promíchání plniva v laku, a to po dobu 30 minut za teploty 30 °C. Jak vyplývá z [21], doba míchání je důležitá a je stanovena na základě objemu pryskyřice a částic směsi, protože lak může mít tendenci degradovat, pokud je doba míchání příliš dlouhá, nebo, je-li vysoká teplota směsi během míchání. Formy byly během míchání směsi důkladně vyčistěny technickým lihem a vloženy do horkovzdušného sterilizátoru STERICEL 55, kde byly předeřhřaty na teplotu 80 °C po dobu 30 minut. Rošt uvnitř horkovzdušného sterilizátoru STERICEL 55 bylo nutné před každým měřením dokonale vyvážit pomocí vodováhy, aby se zabránilo rozlití směsi přes okraj formy a tím znehodnocení vytvrzovaného vzorku. Po dokonalém promíchání lakové směsi byla směs ponechána po dobu 10 minut v klidu, kvůli jejímu ustálení. Během této doby vprchaly ze směsi drobné vzduchové bublinky. Po ustálení byl vypočtený objem směsi vpraven pomocí injekční stříkačky do předeřhřatých forem. Laková směs byla nanášena krouživými pohyby od středu formy k jejímu okraji. Díky snížené viskozitě lakové směsi se po nalití do formy nevytvářely vzduchové vměstky. Po dokonalém rozlití byly vzorky vloženy do laboratorního horkovzdušného sterilizátoru, kde došlo k vytvrzení lakové směsi po stanovenou dobu při dané teplotě, určené materiálovým listem konkrétního laku. Vytvrzené vzorky neobsahovaly

žádné vzduchové vměstky. Pro dokonalé srovnání povrchů vzorků bylo použito různých typů brusných papírů, podle jejich hrubosti.

Důležitým parametrem, který se nedalo vzhledem k laboratorním podmínkám dodržet je absence vakua při zpracování laků a plniv, viz [21]. To mělo za následek zvýšenou přítomnost vzduchových bublin, vlhkosti nebo jiných cizích látek v mřížce laku, které mohou působit jako vady a drasticky tak zhoršit dielektrické vlastnosti vzorku.

#### **2.1.4 Příprava vzorků před měřením**

##### **Vzorky určené pro vyhodnocení vlivu klimatických podmínek**

Vlastnosti vzorků byly zkoumány při postupném navlhání 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 docílilo 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  $MgCl_2$  s hodnotou relativní vlhkosti 33 %. Další exsikátory obsahovaly nasycený roztok  $Mg(NO_3)_2$  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 do komory byly vzorky exponovány nejméně dalších 45 minut z důvodu dokonalého prohřátí na požadovanou teplotu. Poté mohlo začít vlastní měření kapacity a ztrátového činitele v kmitočtové závislosti pro jednotlivé vzorky. Naměřené hodnoty byly dále zpracovány do kmitočtových závislostí relativní permitivity a ztrátového činitele.

## **Vzorky určené k porovnání vlivu druhu plniva na elektrické vlastnosti**

Vzorky určené pro měření za normálních atmosférických podmínek byly uloženy v exsikátoru s relativní vlhkostí 33 %, při pokojové teplotě 23 °C. Při měření vlastností, byl vzorek přímo z exsikátoru vkládán mezi elektrody měřicího přístroje. Po změření byly vzorky vráceny nazpět do exsikátoru.

### **2.2 Měřicí zařízení**

#### **LCR metr Agilent E4980A**

Základní měření byla prováděna na přesném LCR metru Agilent E4980A. Zařízení slouží ke zkoušení komponent, kontrole jakosti a laboratornímu užití. Měřicí přístroj se používá pro hodnocení LCR komponentů, materiálů a polovodičových součástek v široké kmitočtové oblasti 20 Hz až 2 MHz s úrovní testovacího signálu  $0,1 \text{ mV}_{\text{rms}} - 2 \text{ V}_{\text{rms}}$ ,  $50 \mu\text{A} - 20 \text{ mA}_{\text{rms}}$ . Záleží zde však na volbě, kde například možnost 001, znamená, že testovací signál se pohybuje v rozsahu od  $0,1 \text{ mV}_{\text{rms}}$  do  $20 \text{ V}_{\text{rms}}$  a od  $50 \mu\text{A}$  do  $200 \text{ mA}_{\text{rms}}$ . E4980A umožňuje měření C – D (kapacita – ztrátový činitel) se základní přesností  $\pm 0,05 \%$  (C),  $\pm 0,0005$  (D) na všech kmitočtech se sedmi-místným rozlišením (rozlišení ztrátového činitele je 1 ppm) v každém rozsahu. Agilent E4980A používá ve spojení s měřicími programy rozhraní GP-IB/LAN/USB. Toto rozhraní umožňuje automatické testování [2].

Při měření kapacity  $C_x$  a ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  je nutné nastavit předepsané korekce, kvůli potlačení chyb, které vznikají během měření a jsou způsobeny zejména délkou kabelu a jeho rozptylovou admitancí. Korekce slouží k přesnému nastavení počátečního stavu elektrodového systému. Agilent E4980A je vybaven korekcemi OPEN, SHORT, LOAD a korekcí délky vodičů [3].

**Korekce OPEN** – (korekce naprázdno) slouží k eliminaci chyby způsobené rozptylovou admitancí  $Y_0$ . Ta se skládá z parazitní kapacity  $C_p$  mezi vodiči měřicího zařízení a elektrodového systému a z parazitní vodivosti  $G_p$  mezi vodiči připojení. Rozptylová admitance je dána vztahem (23).

$$Y_0 = G_p + j \omega C_p \quad (23)$$

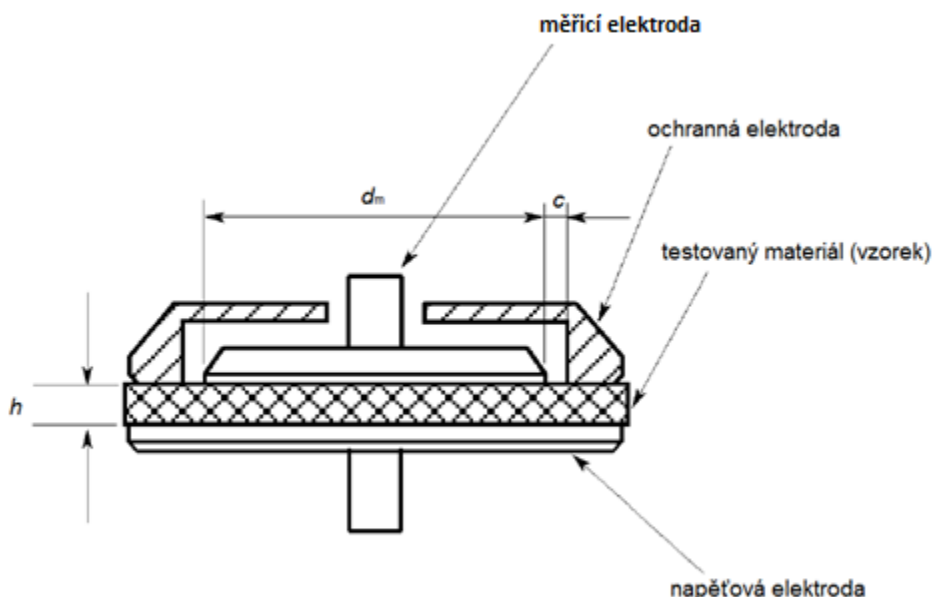
**Korekce SHORT** – (korekce nakrátko) slouží k eliminaci chyby způsobené ztrátovou impedancí  $Z_s$ , která se skládá z parazitní impedance  $R_s$  vodičů připojení měřicího a elektrodového systému a z parazitní indukčnosti  $L_s$  vodičů měřicího zařízení.

$$Z_s = R_s + j \omega L_s \quad (24)$$

**Korekce LOAD** – tato korekce zlepšuje přesnost měření použitím pracovního normálu jako reference [3].

## **Třielektrodový systém Agilent 16451B**

K LCR metru Agilent E4980A byl připojen třielektrodový rovinný systém Agilent 16451B, který je určen k měření tuhých dielektrických materiálů. Měřicí systém se skládá ze tří elektrod: měřicí, napěťové a ochranné (stínící), jak je vidět na obr. 20. Ochranná elektroda snižuje vliv okrajové a zemní kapacity měřicí elektrody a vylučuje vliv povrchového svodu na výsledek měření. Efektivnost ochranné elektrody je tím větší, čím menší je mezera a rozdíl potenciálů mezi měřicí a ochrannou elektrodou. Při vlastním měření jsou vzorky vkládány přímo mezi elektrody a LCR metr proměřuje kmitočtové závislosti jejich kapacity a ztrátového činitele. Je potřeba, aby průměr testovaného materiálu byl větší nebo roven 40 mm a menší nebo roven 56 mm. Tloušťka materiálu musí být menší nebo rovna 10 mm [1].



Obr. 20 Schéma měřicího elektrodového systému Agilent 16451B [1].

Na obr. 20 je znázorněno schéma třielektrodového systému, kde  $d_m$  je průměr měřicí elektrody,  $c$  je vzdálenost mezi měřicí a stínící elektrodou,  $h$  je tloušťka vzorku.

### **Program Agilent VEE Pro**

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

Software Agilent VEE Pro je graficky orientované vývojové prostředí pro tvorbu programových aplikací pro automatizaci měřících procesů, zpracování dat a řízení. Tvorba programu zjednodušeně odpovídá vytváření vývojového diagramu automatizovaného

měřicího procesu. Maximální důraz je kladen na jednoduchost propojení s měřicími přístroji prostřednictvím sběrnic GPIB, LAN, USB, RS-232 či VXI, k dispozici jsou ovladače pro více než 1000 měřících přístrojů od 70 různých výrobců [4].

### **2.3 Výpočet složek komplexní permitivity**

Geometrická kapacita vzorku se určí ze vztahu

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{\pi (d_m + c)^2}{4 h} \quad (25)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $d_m$  je průměr měřicí elektrody,  $c$  je vzdálenost mezi měřicí a stínící elektrodou,  $h$  je tloušťka vzorku.

Pro výpočet relativní permitivity  $\varepsilon'$  byl použit vztah (1), udávající poměr mezi naměřenou kapacitou a geometrickou kapacitou elektrodového systému.

Ztrátové číslo (imaginární část komplexní permitivity) se vypočte pomocí vztahu (26), udávajícího závislost mezi relativní permitivitou a ztrátovým činitelem:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \quad (26)$$

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

### **2.4 Tloušťky a hmotnosti lakových vzorků**

Tloušťky lakových vzorků, uvedené v tab. 4, tab. 5 a tab. 6 jsou střední hodnotou osmi náhodně naměřených hodnot na ploše vzorku. K měření tloušťky byl použit digitální mikrometr firmy Schut (Schut Geometrical Metrology) s označením IP 54. Pro zjištění hmotnosti lakových vzorků bylo použito elektronické laboratorní váhy WPS 360/C/2.

Tab. 4 Přehled tloušťek a hmotností jednotlivých vzorků vyrobených z laku TSA 220S plněných mikročásticemi

| vzorek č. | plnění (%) | tloušťka $h$ (mm) | hmotnost $m$ (g) |
|-----------|------------|-------------------|------------------|
| 1         | 0          | 2,46              | 9,04             |
| 2         |            | 2,26              | 7,78             |
| 3         |            | 2,21              | 8,27             |
| 4         |            | 2,76              | 10,2             |
| 5         |            | 2,62              | 9,37             |
| 6         |            | 2,67              | 9,85             |
| 7         |            | 2,75              | 10,0             |
| 8         |            | 3,09              | 13,5             |
| 9         |            | 4,47              | 15,3             |
| 1         | 4          | 2,75              | 9,79             |
| 2         |            | 2,23              | 8,36             |
| 3         |            | 2,44              | 8,20             |
| 4         |            | 2,93              | 11,0             |
| 5         |            | 2,81              | 10,6             |
| 6         |            | 3,11              | 11,6             |
| 7         |            | 3,23              | 11,8             |
| 8         |            | 4,31              | 15,0             |
| 9         |            | 5,38              | 18,6             |
| 1         | 8          | 2,95              | 11,3             |
| 2         |            | 2,37              | 8,20             |
| 3         |            | 2,26              | 8,84             |
| 4         |            | 2,99              | 11,2             |
| 5         |            | 2,99              | 11,1             |
| 6         |            | 3,00              | 11,3             |
| 7         |            | 2,97              | 11,3             |
| 8         |            | 5,08              | 17,9             |
| 9         |            | 5,31              | 18,7             |
| 1         | 12         | 3,01              | 11,6             |
| 2         |            | 2,28              | 8,92             |
| 3         |            | 2,41              | 8,65             |
| 4         |            | 3,10              | 11,9             |
| 5         |            | 3,48              | 13,3             |
| 6         |            | 3,08              | 12,0             |
| 7         |            | 3,22              | 12,4             |
| 8         |            | 4,63              | 16,6             |
| 9         |            | 5,45              | 19,5             |

Tab. 5 Přehled tloušťek a hmotností vzorků vyrobených z laku Dolphon XL 2102 plněných mikročásticemi

| vzorek č. | plnění (%) | tloušťka $h$ (mm) | hmotnost $m$ (g) |
|-----------|------------|-------------------|------------------|
| 1         | 2          | 0,999             | 4,71             |
| 2         |            | 0,996             | 4,73             |
| 3         |            | 0,995             | 5,01             |
| 1         | 4          | 0,992             | 4,27             |
| 2         |            | 0,990             | 4,39             |
| 3         |            | 0,993             | 4,18             |
| 1         | 6          | 0,984             | 4,58             |
| 2         |            | 0,987             | 4,37             |
| 3         |            | 0,980             | 4,15             |
| 1         | 8          | 0,999             | 5,00             |
| 2         |            | 0,998             | 5,15             |
| 3         |            | 0,999             | 5,06             |

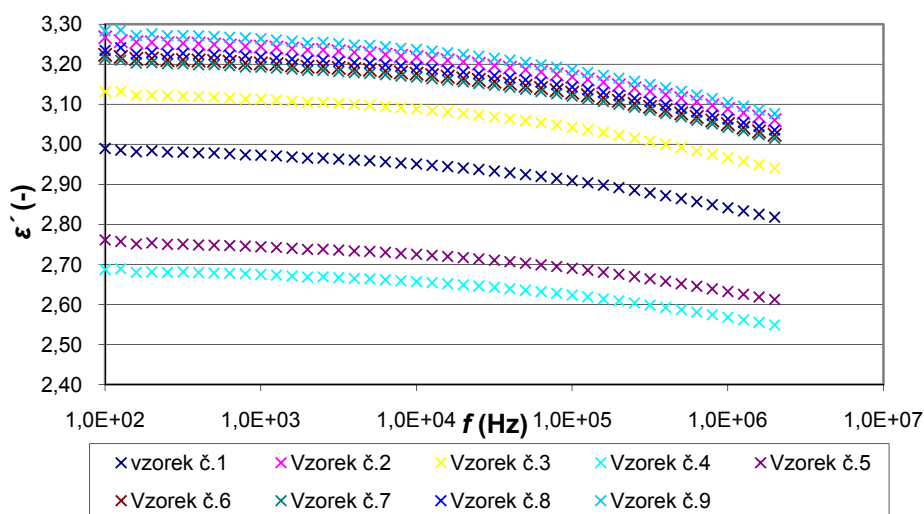
Tab. 6 Přehled tloušťek a hmotností vzorků vyrobených z laku Dolphon XL 2102 plněných nanočásticemi

| vzorek č. | plnění (%) | tloušťka $h$ (mm) | hmotnost $m$ (g) |
|-----------|------------|-------------------|------------------|
| 1         | 0          | 1,02              | 4,81             |
| 2         |            | 1,02              | 4,62             |
| 3         |            | 1,01              | 4,63             |
| 1         | 1          | 1,00              | 4,45             |
| 2         |            | 1,04              | 4,67             |
| 3         |            | 1,04              | 4,66             |
| 1         | 2          | 1,26              | 5,20             |
| 2         |            | 1,14              | 5,08             |
| 3         |            | 1,34              | 5,78             |
| 1         | 3          | 1,09              | 4,81             |
| 2         |            | 1,01              | 4,12             |
| 3         |            | 0,952             | 3,81             |

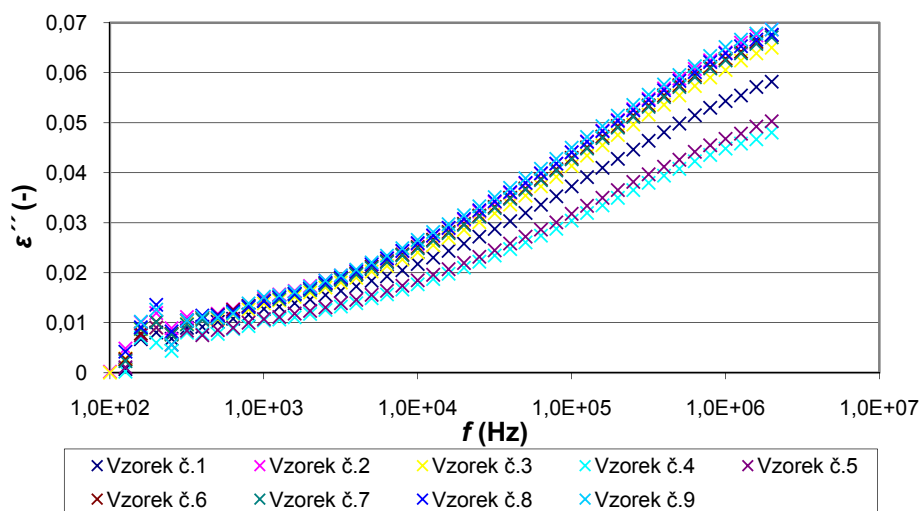
## 2.5 Výsledky měření

### Vyhodnocení vlivu klimatických podmínek na vzorky

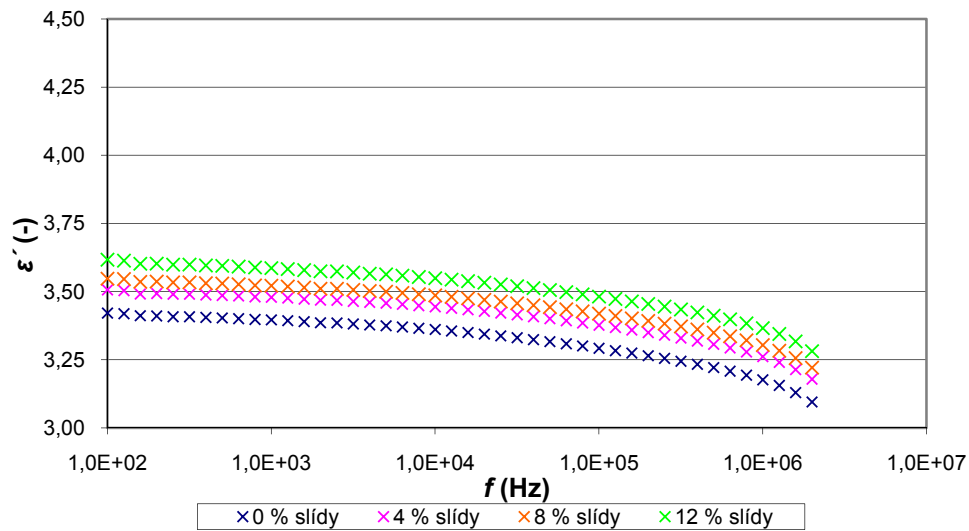
Měření kmitočtových závislostí relativní permitivity a ztrátového činitele bylo realizováno na 36 vzorcích (4 sady po 9 vzorcích) ve vysušeném stavu a v průběhu navlhání. Výsledky měření na vysušených vzorcích čistého laku při teplotě 20 °C ukazuje obr. 21 a obr. 22, pro další vyhodnocení byly použity průměry relativní permitivity a ztrátového čísla shodných 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.



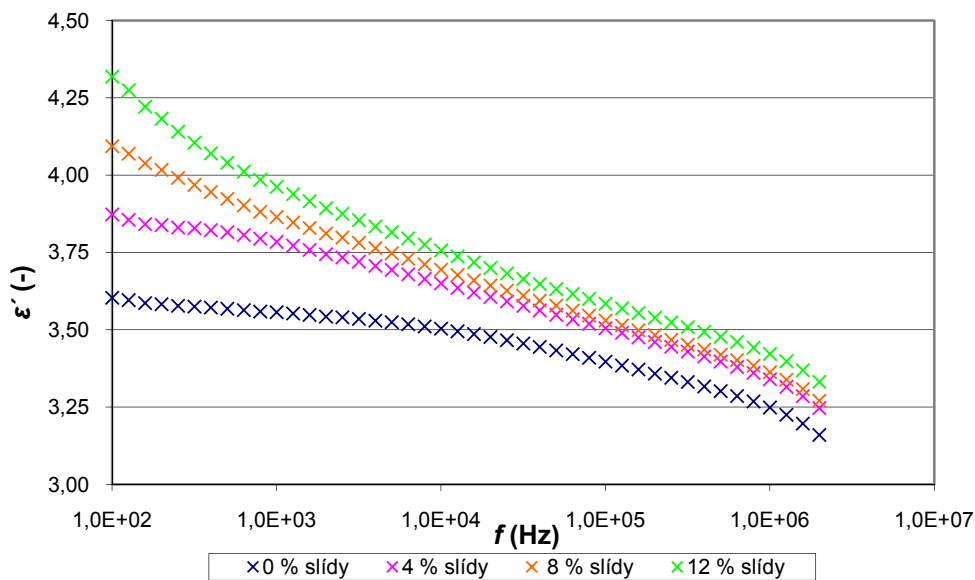
Obr. 21: Kmitočtová závislost relativní permitivity pro vzorky s 0% podílem mleté slídy při relativní vlhkosti 0 %.



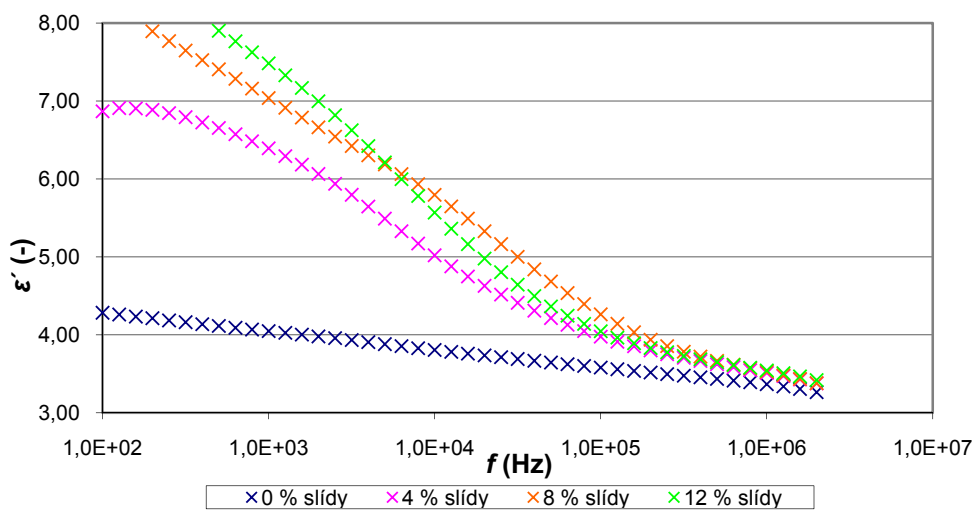
Obr. 22: Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro vzorky s 0% podílem slídy při relativní vlhkosti 0 %.



a)

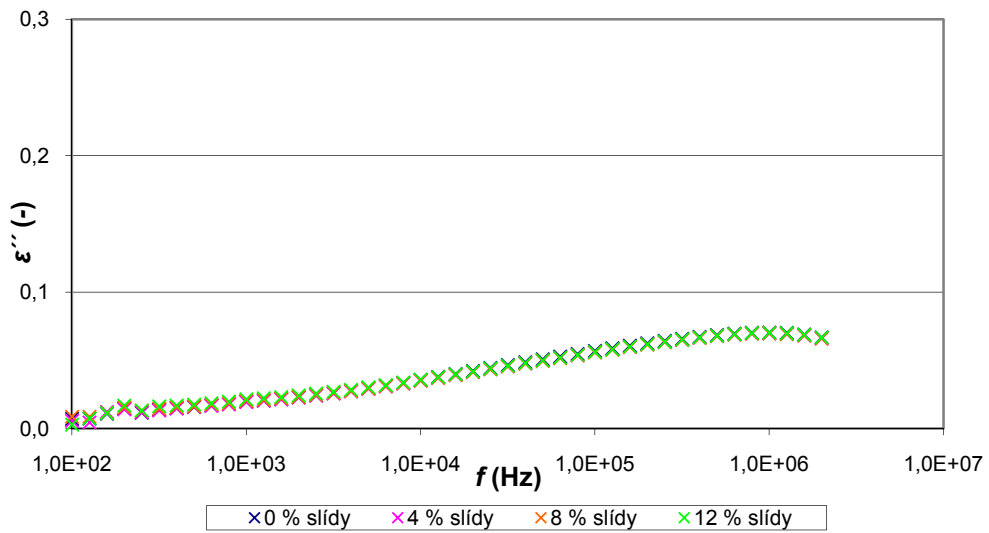


b)

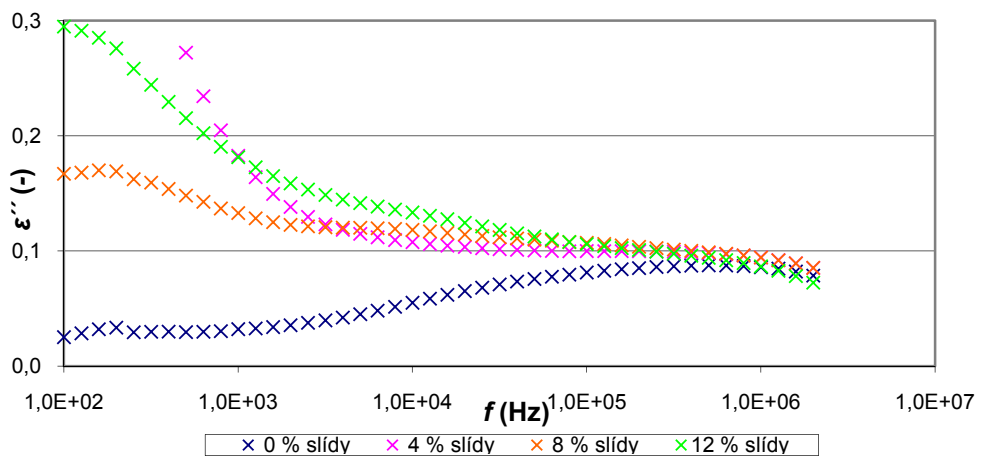


c)

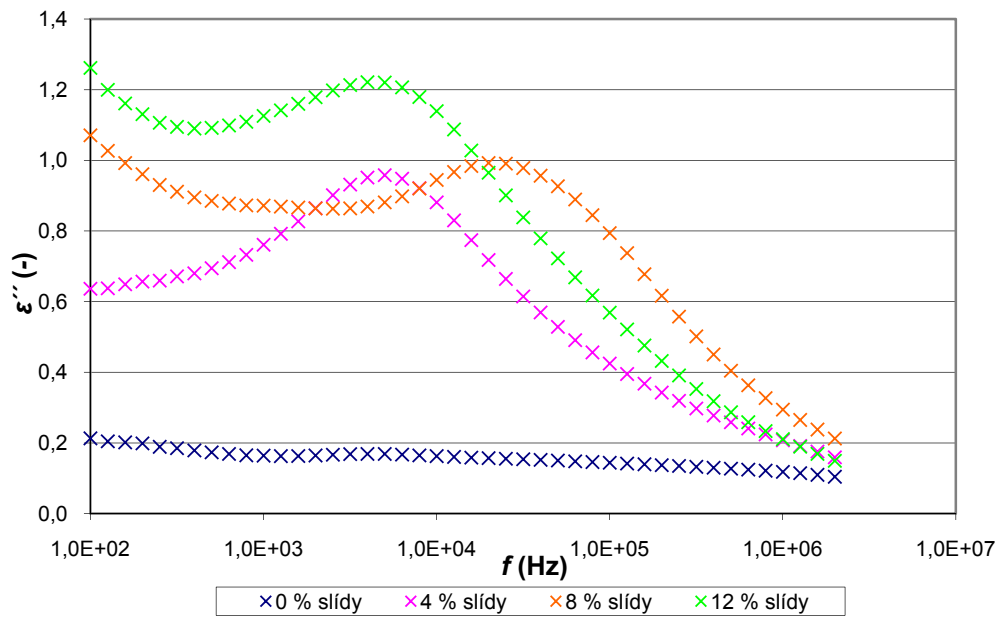
Obr. 23: Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků s různým plněním slídou a měnící se relativní vlhkosti 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c) při  $\vartheta = 20$  °C.



a)

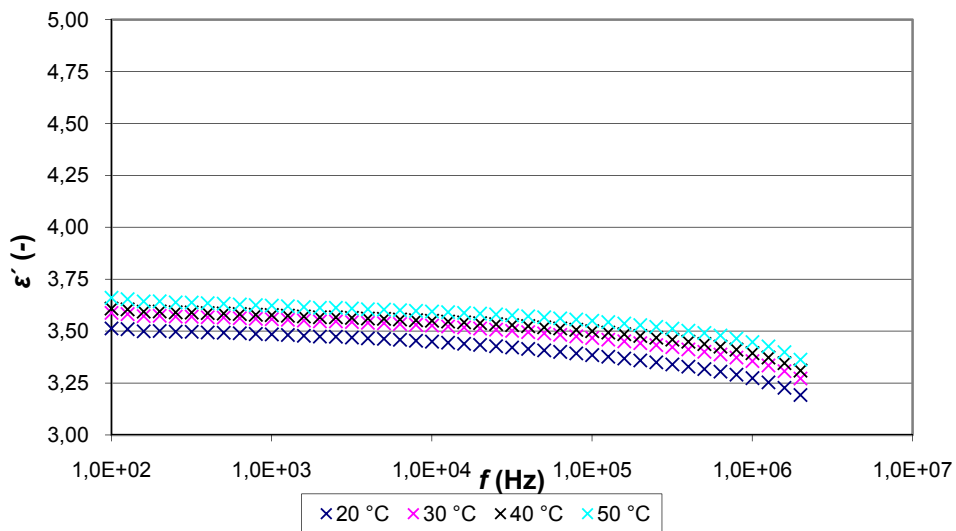


b)

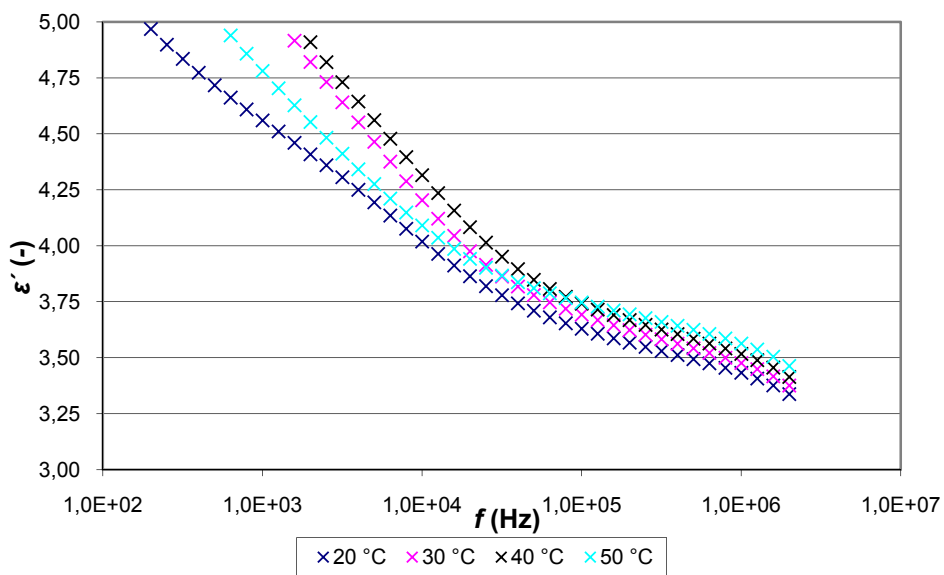


c)

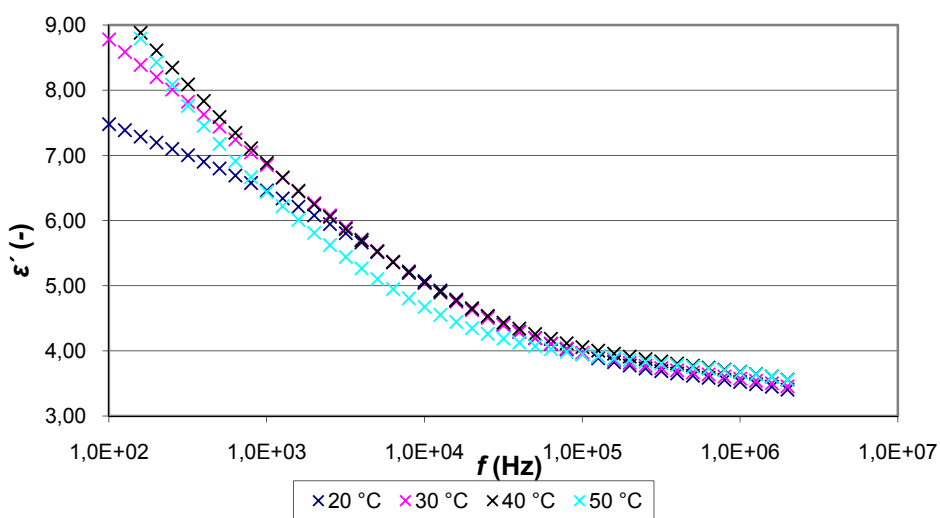
Obr. 24: Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků s různým plněním slídou a měnící se relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c) při  $\vartheta = 20$  °C.



a)

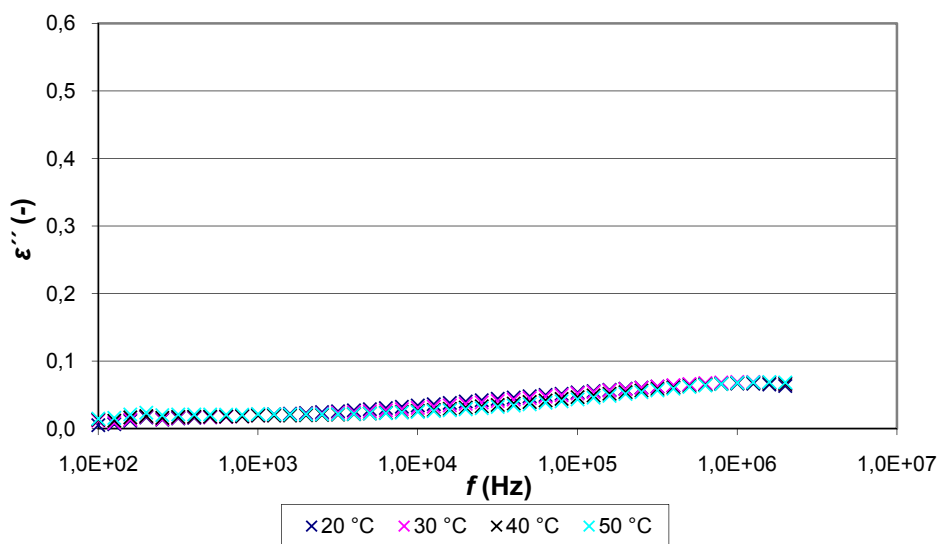


b)

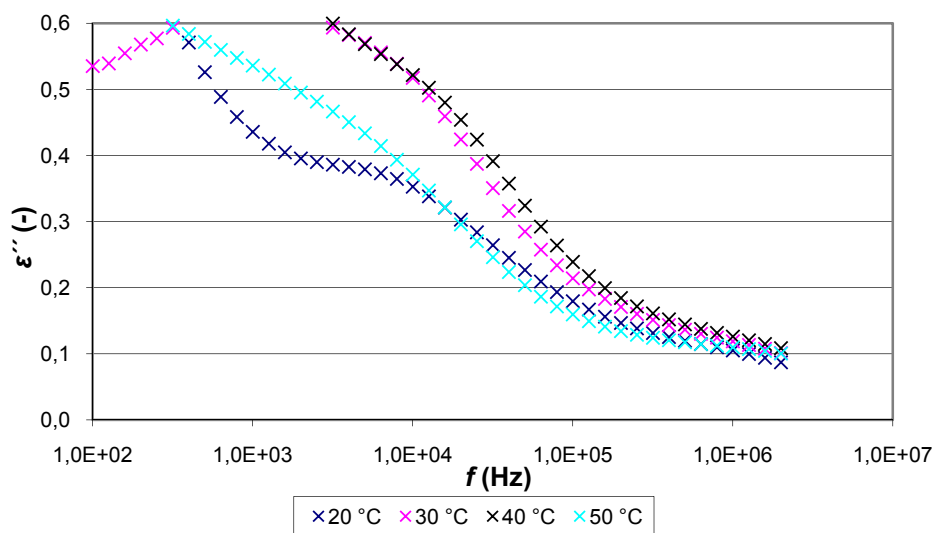


c)

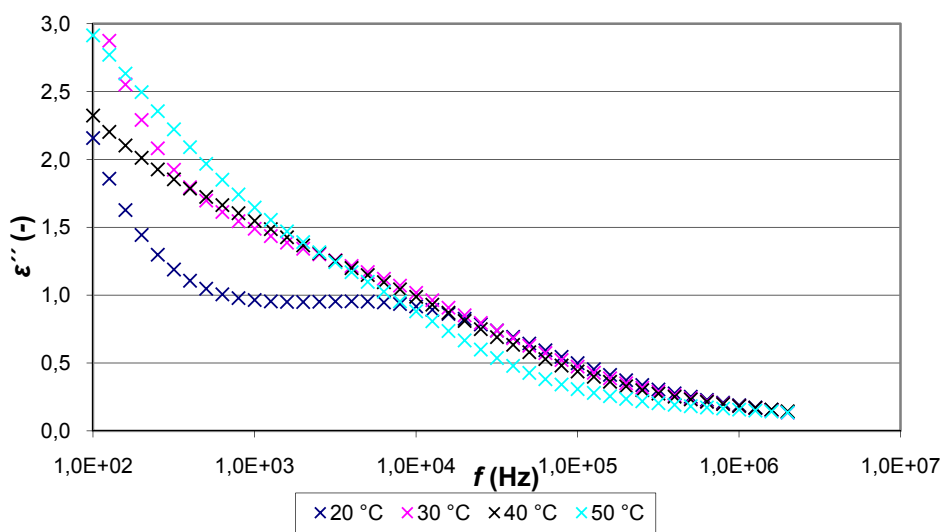
Obr. 25: Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků, s 12% podílem mikromleté slídy, s měnící se teplotou a relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c).



a)

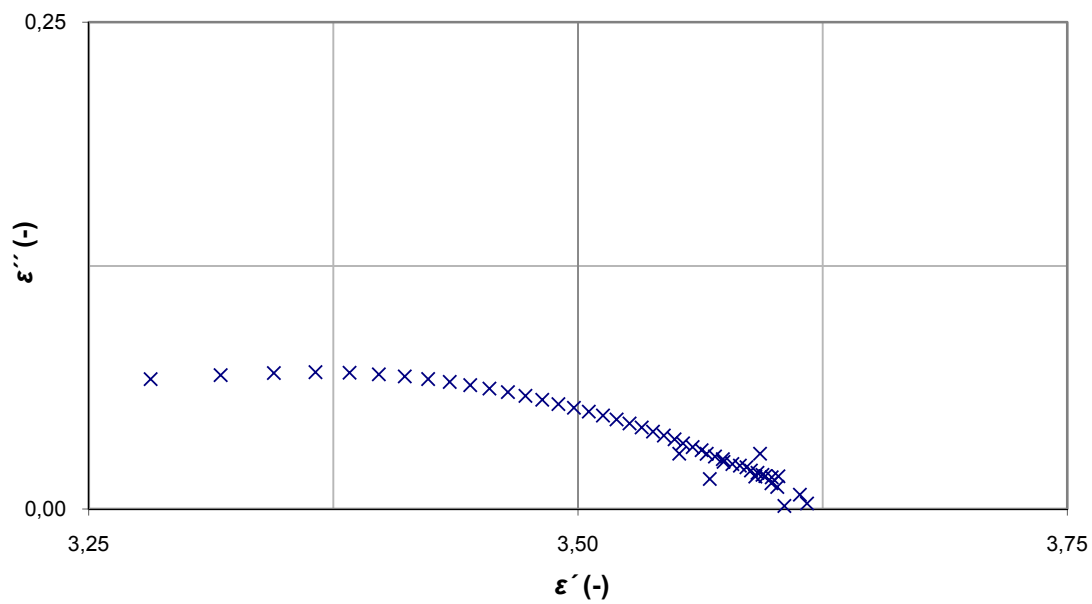


b)

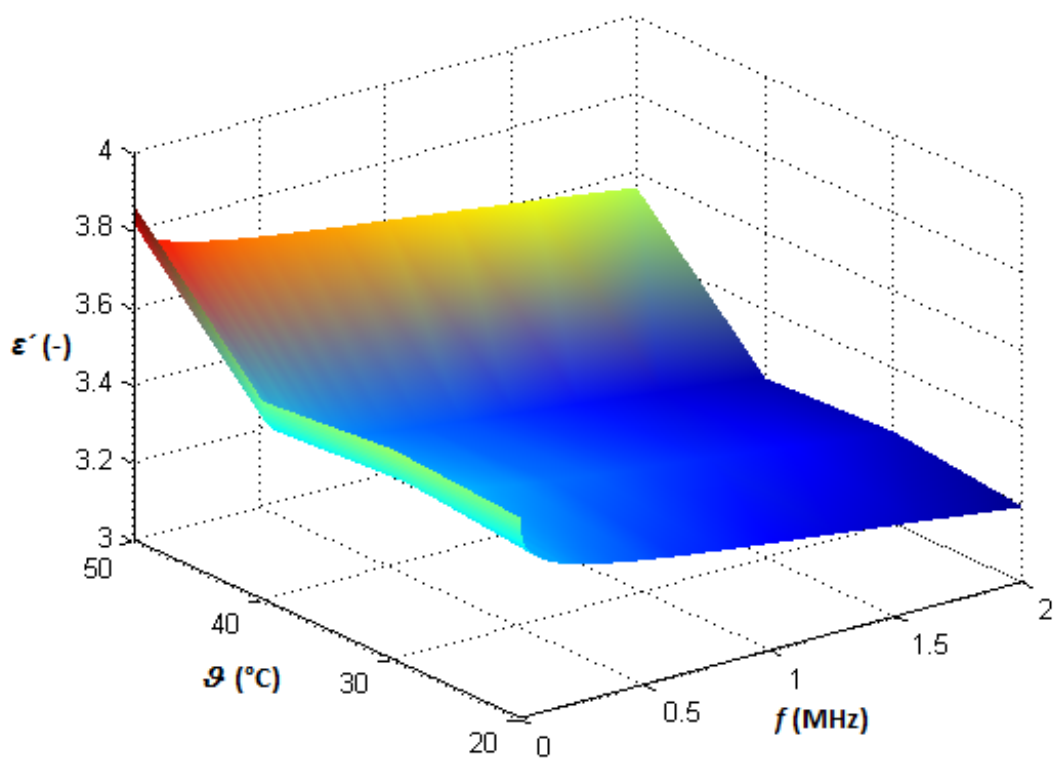


c)

Obr. 26: Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků, s 12% podílem mikromleté slídy, s měnící se teplotou a relativní vlhkostí 33 % (a), 55 % (b), 75 % (c).



Obr. 27: Závislost  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  lakového vzorku s 12% plněním slídou a relativní vlhkostí 33 % při  $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 28: 3D graf závislosti relativní permitivity na teplotě a kmitočtu pro lakové vzorky s 8% plněním slídou při relativní vlhkosti 33 %.

Na obr. 21 a obr. 22 jsou grafické průběhy závislostí relativní permitivity (obr. 21) a ztrátového čísla (obr. 22) na kmitočtu pro vysušené vzorky vytvrzeného čistého laku při teplotě  $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z obr. 21 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 kmitočtové průběhy vlastností vykazovaly nejmenší odchylky. Průměrná relativní permitivita je 3,24 pro kmitočet 100 Hz. Ztrátové číslo je okolo kmitočtu 100 Hz zanedbatelné, od 1 kHz se začínají ztráty zvyšovat, jak je vidět na obr. 22.

Z hlediska vypovídací schopnosti by měly mít všechny obrázky (obr. 23 – obr. 26) stejné měřítko, ale z důvodů prudkého nárůstu hodnot složek komplexní permitivity při relativní vlhkosti 75 %, byla pro tuto vlhkost zvolena jiná měřítko.

Z obr. 23 je patrné zvyšování hodnoty relativní permitivity u lakových vzorků s různým plněním slídou při rostoucí relativní vlhkosti. Pro hodnotu relativní vlhkosti 33 % (obr. 23 a)) je hodnota relativní permitivity lakového vzorku s 4% plněním slídou při kmitočtu 100 Hz 3,50. Při relativní vlhkosti 75 % (obr. 23 c)) je pro tento lakový vzorek při stejném kmitočtu hodnota relativní permitivity 6,86. Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se procentem slídy jako plniva je kompozitní materiál schopen více navlhát. Zvyšování vlhkosti lakových vzorků tedy způsobuje nárůst relativní permitivity, protože se zvyšováním vlhkosti v lakových vzorcích narůstá celkový počet polárních částí, a v důsledku toho se zvyšuje i polarizace.

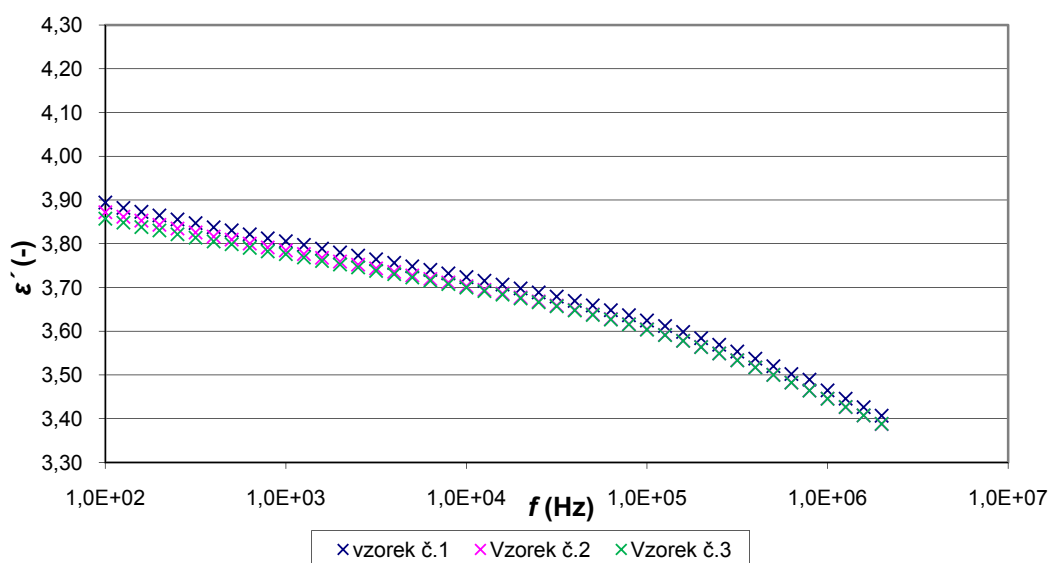
S rostoucí relativní vlhkostí u lakových vzorků s různým plněním slídou roste i ztrátové číslo a projevují se zde jednotlivá relaxační maxima, jak je vidět na obr. 24. Při relativní vlhkosti 33 % (obr. 24 a)) je ztrátové číslo lakových vzorků pro kmitočet 100 Hz zanedbatelné. S rostoucím kmitočtem vzrůstají ztrátová čísla lakových vzorků až k hodnotě 0,07 (pro kmitočet 1 MHz). Pro hodnoty vyšších relativních vlhkostí ztrátová čísla lakových vzorků s různým hmotnostním plněním slídou rostou a mění svůj průběh, projevují se zde relaxační maxima. U vzorků z čistého laku ztrátová čísla nemění svůj průběh a nemají relaxační maxima, (obr. 24 c)). Lakové vzorky se 4% a 12% plněním slídou mají relaxační maxima přibližně při kmitočtu 5 kHz. Tato relaxační maxima souvisejí s pohlčováním vodní páry vzorky. Molekuly vody jsou polární, proto zde převládá zřejmě polarizace dipólová, která je podmíněna přítomností permanentních dipólů, jakými jsou molekuly vody, které se mohou ve vnějším poli natáčet.

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. 25. 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).

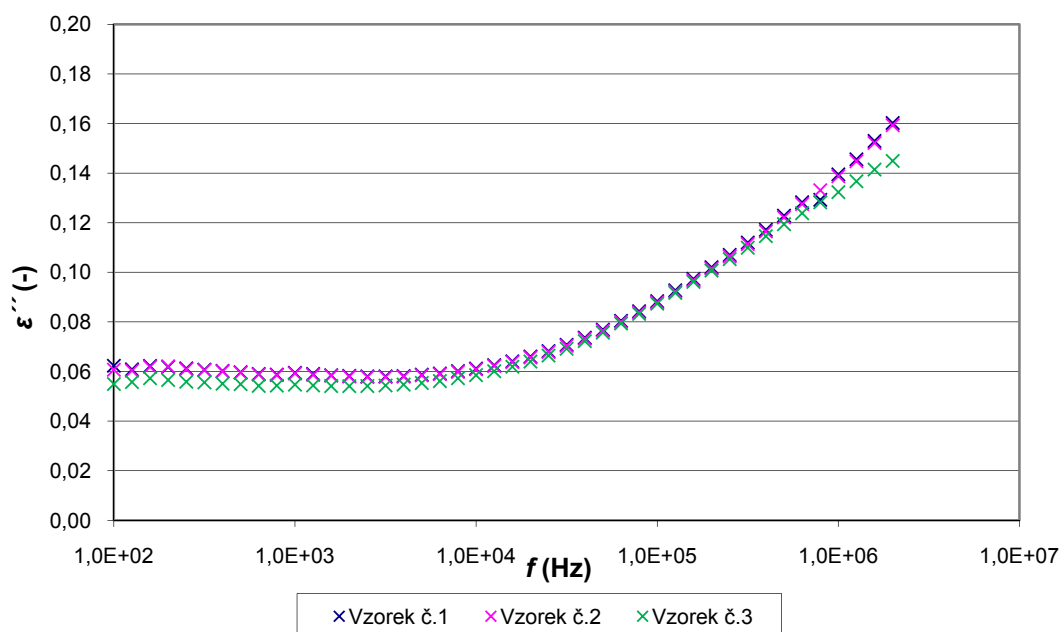
Ztrátová čísla lakových vzorků s 12% podílem slídy s rostoucí teplotou a relativní vlhkostí narůstají, tento nárůst je větší při nižších kmitočtech, jak je vidět na obr. 26.

### Porovnání vlivu typu plniva na elektrické vlastnosti vzorků

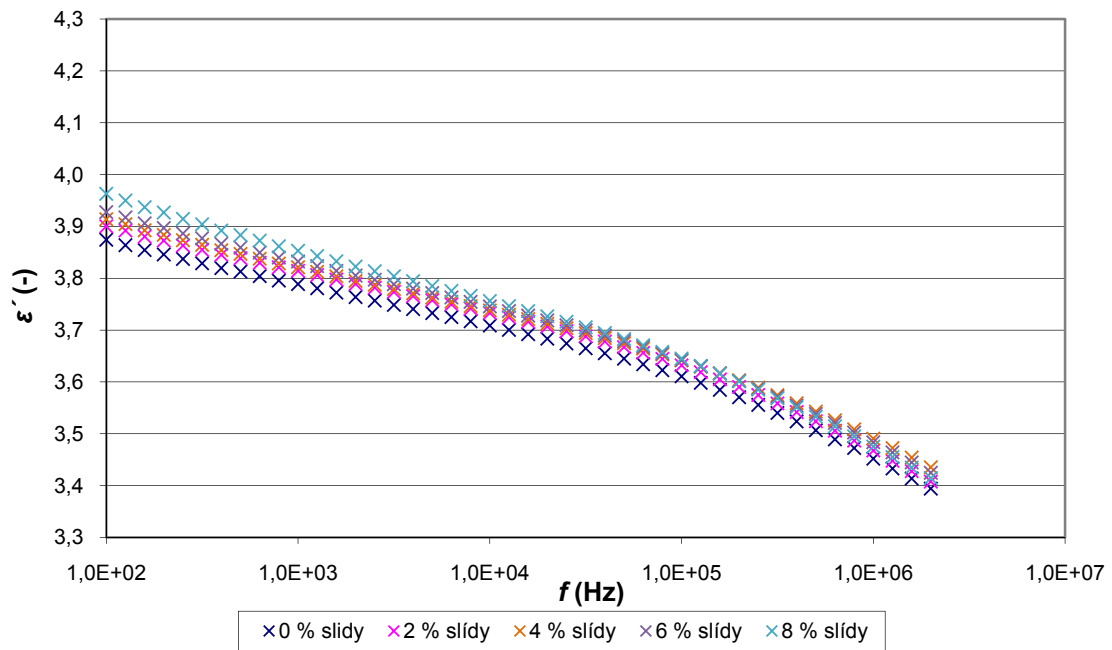
Měření kmitočtových závislostí relativní permitivity a ztrátového čísla bylo realizováno na 12 vzorcích s 2%, 4%, 6%, 8% hmotnostním podílem mikromleté slídy a na 12 vzorcích s 0%, 1%, 2%, 3% hmotnostním podílem  $\text{SiO}_2$  v podobě nanočástic za normálních atmosférických podmínek. Výsledky měření na vzorcích čistého laku při teplotě okolí ukazuje obr. 29 a obr. 30. Výsledky experimentů jsou vyjádřeny následujícími obrázky, které ukazují vliv hmotnostního podílu a typu plniva na kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla, tedy složky komplexní permitivity lakových vzorků s různým hmotnostním podílem mikromleté slídy a oxidu křemičitého v podobě nanoplňiva.



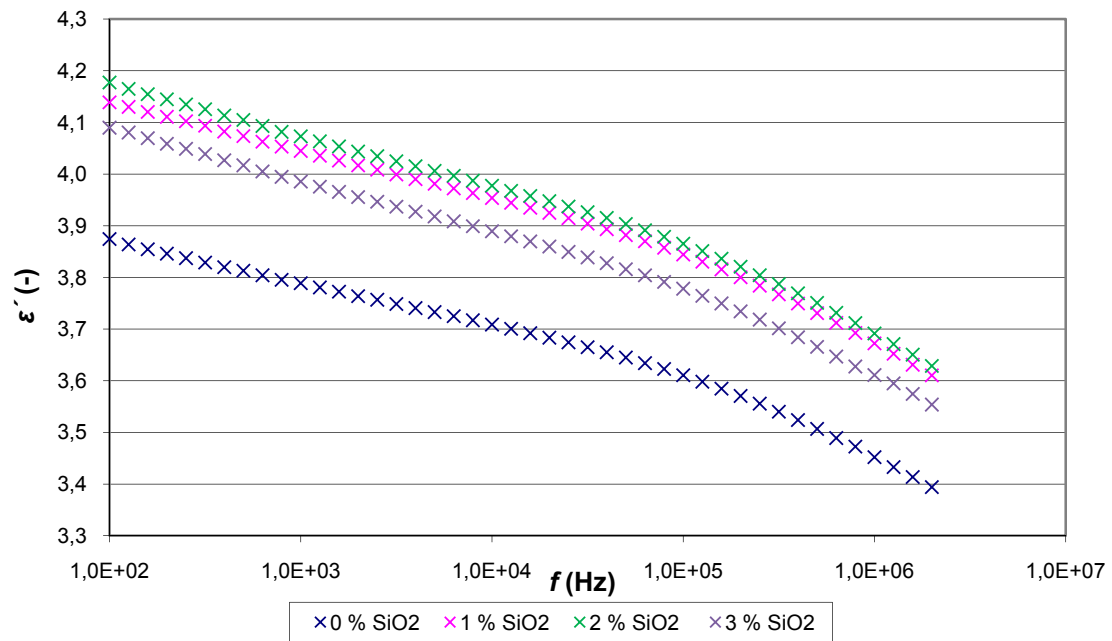
Obr. 29: Kmitočtová závislost relativní permitivity pro vzorky s 0% podílem plniva.



Obr. 30: Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro vzorky s 0% podílem plniva.

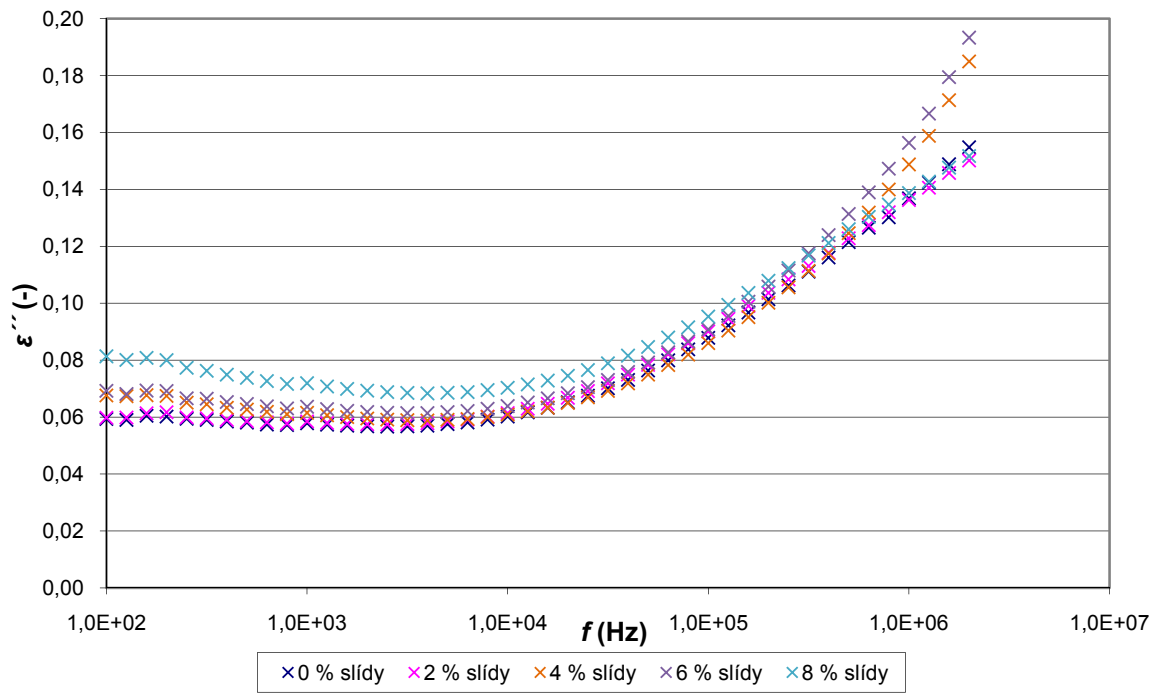


a)

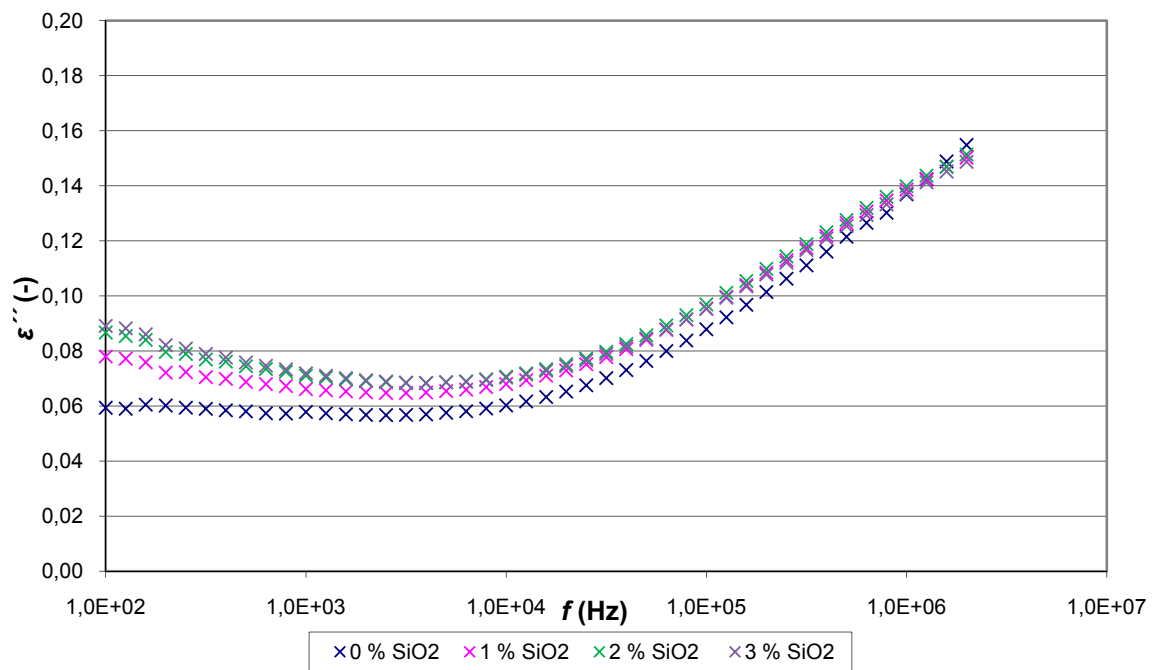


b)

Obr. 31: Kmitočtové závislosti relativní permitivity lakových vzorků s různým plněním a měnícím se typem plniva, mikročastic slídy (a), nanočastic  $\text{SiO}_2$  (b).

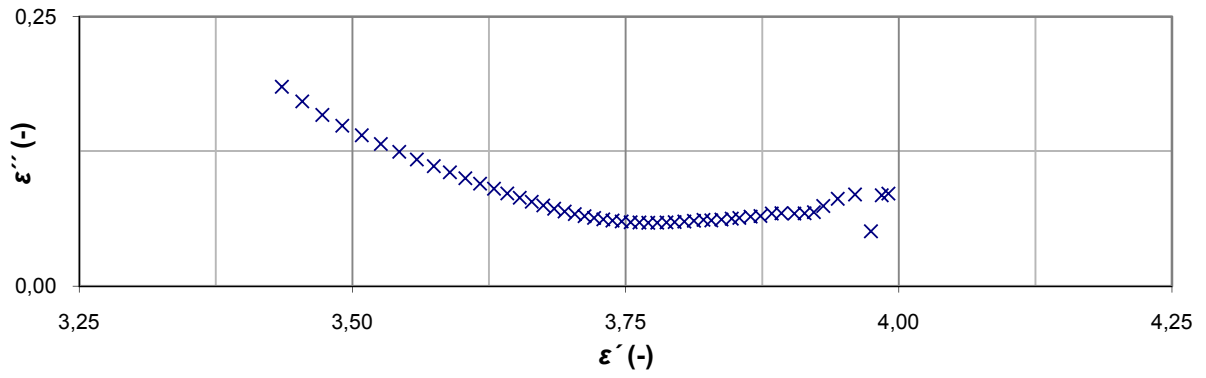


a)

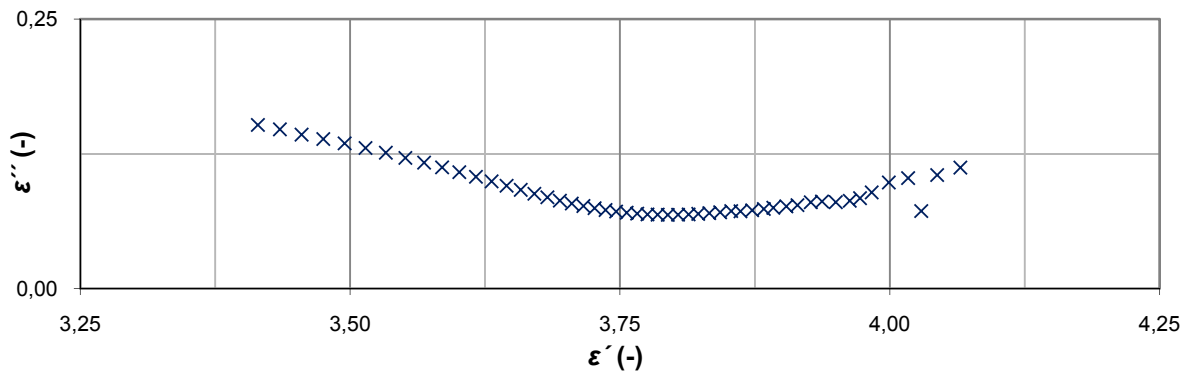


b)

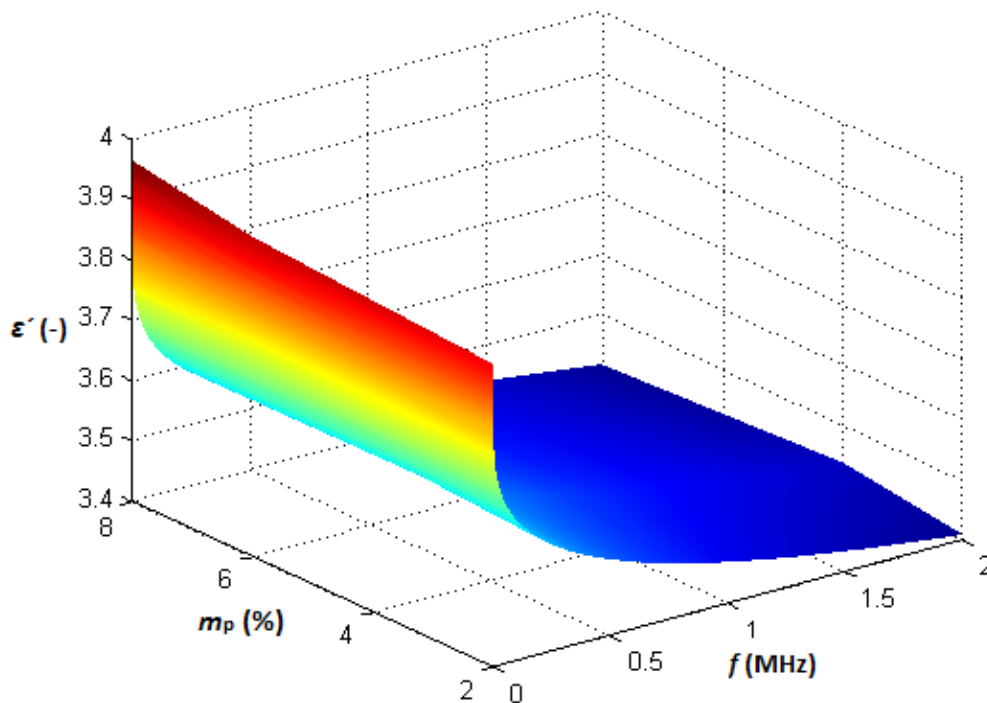
Obr. 32: Kmitočtové závislosti ztrátového čísla lakových vzorků s různým hmotnostním plněním a měnícím se typem plniva, mikročastic slídy (a), nanočastic  $\text{SiO}_2$  (b).



Obr. 33: Závislost  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  lakového vzorku se 4% plněním slídou.



Obr. 34: Závislost  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  lakového vzorku s 8% plněním slídou.



Obr. 35: 3D graf závislosti relativní permitivity na hmotnostním plnění slídou a kmitočtu pro lakové vzorky.

Na obr. 29 a obr. 30 jsou grafické průběhy závislosti relativní permitivity (obr. 29) a ztrátového čísla (obr. 30) na kmitočtu pro vzorky vytvrzeného čistého laku při teplotě okolí. Z obr. 29 je vidět, že hodnota relativní permitivity se pohybuje v rozmezí 3,85 až 3,89 (pro kmitočet 100 Hz). Tyto hodnoty s rostoucím kmitočtem klesají. Pro další vyhodnocování bylo použito průměrných hodnot zjištěných parametrů vzorků. Průměrná relativní permitivita je 3,87 pro kmitočet 100 Hz. Ztrátové číslo je okolo kmitočtu 100 Hz zanedbatelné, od kmitočtu 10 kHz se začínají ztráty zvyšovat, jak je vidět na obr. 30.

Z obr. 31 je patrné zvyšování hodnoty relativní permitivity u lakových vzorků s rostoucím hmotnostním plněním slídou (obr. 31 a)) a s rostoucím hmotnostním plněním  $\text{SiO}_2$  (obr. 31 b)). Na obr. 31 a) vidíme, že hodnota relativní permitivity lakových vzorků se nepatrně zvyšuje s rostoucím hmotnostním plněním slídou. Hodnota relativní permitivity čistého lakového vzorku při kmitočtu 100 Hz je 3,87. Při 2% plnění slídou je hodnota relativní permitivity lakového vzorku při stejném kmitočtu 3,90. Pro lakový vzorek s 8% plněním slídou stoupla hodnota relativní permitivity při stejném kmitočtu na 3,96. Pro lakový vzorek s 1% plněním  $\text{SiO}_2$  (obr. 31 b)) vzrostla hodnota relativní permitivity při stejném kmitočtu na 4,13. Z toho vyplývá, že relativní permitivita lakových vzorků vzroste již při přidání 1 % hmotnostního podílu nanočástic  $\text{SiO}_2$  o několik řádů, v porovnání s mikromletou slídou, kde tato změna hodnoty relativní permitivity není tak výrazná při tak malém hmotnostním podílu v lakovém vzorku. S dalším zvyšováním hmotnostního podílu nanočástic  $\text{SiO}_2$  v lakových vzorcích se relativní permitivita příliš nemění. V některých literárních zdrojích ([21], [24]) je v mnoha případech pozorován pokles relativní permitivity při plnění kompozitu nanočásticemi v množství několika procent. Zvýšení hodnot relativní permitivity měřených kompozitních materiálů může být způsobeno nerovnoměrným rozptylem a hromaděním nanoplňiv, případně neúmyslně přimíchanými nečistotami během výroby.

Z obr. 32 je patrné zvyšování hodnoty ztrátového čísla u lakových vzorků s rostoucím hmotnostním plněním slídou (obr. 32 a)) a rostoucím hmotnostním plněním  $\text{SiO}_2$  v podobě nanočástic (obr. 32 b)). Na obr. 32 a) je vidět, že ztrátová čísla lakových vzorků plněných mikromletou slídou jsou pro kmitočet 100 Hz zanedbatelná, s rostoucím kmitočtem vzrůstají až k hodnotě 0,20 (pro kmitočet 1 MHz). Z obr. 32 b) je patrné, že hodnoty ztrátového čísla lakových vzorků vzrůstají s rostoucím hmotnostním plněním nanočástic  $\text{SiO}_2$  v kmitočtovém pásmu 100 Hz až 10 kHz, oproti hodnotám lakových vzorků bez plniva (čistého laku). S rostoucím kmitočtem se hodnoty ztrátových čísel lakových vzorků plněných  $\text{SiO}_2$  vrací k hodnotám lakových vzorků bez plniva. Porovnáme-li obr. 32 a) a obr. 32 b), je vidět, že již při přidání 1 % hmotnostního podílu nanočástic  $\text{SiO}_2$  vzroste ztrátové číslo lakových vzorků na hodnotu 0,078 (pro kmitočet 100 Hz), zatímco ztrátové číslo lakových vzorků plněných mikromletou slídou dosáhne této hodnoty u vzorku s 8% hmotnostním podílem. Relaxační maxima se v námi měřeném kmitočtovém rozsahu 100 Hz - 2 MHz nevyskytují.

## 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 1.9.1. Pro ukázkou je zde ukázán postup výpočtů relativní permitivity pomocí směsných vztahů pro vzorky z epoxidového impregnačního laku Epoxylite TSA 220S plněného mikromletou slídou. Pro ostatní sady vzorků jsou uvedeny tabulky s naměřenými a vypočtenými hodnotami. Na příloženém CD jsou soubory MS Excel se všemi výpočty.

### Výpočty směsných vztahů pro vzorky z laku TSA 220S plněného slídou

Nejprve byly vypočteny z geometrických rozměrů a hmotností hustota čisté slídy a hustota čistého laku

$$\rho_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{slidy}}}{V_{\text{slidy}}} = \frac{0,601 \cdot 10^{-3}}{0,225 \cdot 10^{-6}} = 2,67 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3} \quad (27)$$

$$\rho_{\text{laku}} = \frac{m_{\text{laku}}}{V_{\text{laku}}} = \frac{14,4 \cdot 10^{-3}}{12,0 \cdot 10^{-6}} = 1,19 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3} \quad (28)$$

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 se 4% podílem mikromleté slídy:

$$V_{\text{vzorku}} = \pi r^2 h = 3,14 (30,1 \cdot 10^{-3})^2 4,31 \cdot 10^{-3} = 12,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (29)$$

$$m_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{vzorku}}}{100} 4 = \frac{15,0 \cdot 10^{-3}}{100} 4 = 0,601 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad (30)$$

$$V_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{slidy}}}{\rho_{\text{slidy}}} = \frac{0,601 \cdot 10^{-3}}{2,67 \cdot 10^3} = 0,225 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (31)$$

$$v_1 = \frac{V_{\text{slidy}}}{V_{\text{vzorku}}} = \frac{0,225 \cdot 10^{-6}}{12,3 \cdot 10^{-6}} = 0,018 \quad (32)$$

$$v_2 = 1 - v_1 = 1 - 0,018 = 0,981 \quad (33)$$

Z každé sady byly vybrány 2 vzorky, pro které byla vypočtena hodnota relativní permitivity podle směsných vztahů. Hodnoty  $\varepsilon'_1$  a  $\varepsilon'_2$  jsou odečteny ze změřených průměrných hodnot relativních permitivit čisté slídy ( $\varepsilon'_1$ ) a čistého laku ( $\varepsilon'_2$ ) pro daný kmitočet 1002 Hz. Vypočtené hodnoty byly srovnány s průměrnými hodnotami naměřených relativních permitivit lakových vzorků s odpovídajícím podílem mikromleté slídy (viz tab. 7, tab. 8, tab. 9). Pro ukázkou jsou zde uvedeny příklady výpočtů pomocí jednotlivých směsných vztahů pro vzorek číslo 8 s 4% podílem mikromleté slídy [19]. U uvedených příkladů výpočtů

a v tabulkách bylo zvoleno větší rozlišení vypočtených a naměřených hodnot z důvodu viditelnosti změn, ke kterým dochází mezi jednotlivými vztahy a naměřenými hodnotami.

Lichteneckerův logaritmický vztah:

$$\begin{aligned}\log \varepsilon'_s &= \nu_1 \log \varepsilon'_1 + \nu_2 \log \varepsilon'_2 \\ \log \varepsilon'_s &= 0,018 \log 5,050 + 0,981 \log 3,224 \\ \log \varepsilon'_s &= 0,511 \\ \varepsilon'_s &= 3,251\end{aligned}\tag{34}$$

Lichteneckerův mocniný vztah pro  $k = 1$ :

$$\begin{aligned}\varepsilon'_s &= \nu_1 \varepsilon'_1 + \nu_2 \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_s &= 0,018 \cdot 5,050 + 0,981 \cdot 3,224 \\ \varepsilon'_s &= 3,257\end{aligned}\tag{35}$$

Lichteneckerův mocniný vztah pro  $k = -1$ :

$$\begin{aligned}\frac{1}{\varepsilon'_s} &= \nu_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + \nu_2 \frac{1}{\varepsilon'_2} \\ \frac{1}{\varepsilon'_s} &= 0,018 \frac{1}{5,050} + 0,981 \frac{1}{3,224} \\ \varepsilon'_s &= 3,246\end{aligned}\tag{36}$$

Maxwellův vztah:

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} &= 3 \nu_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \\ \varepsilon'_s &= \left( 3 \nu_1 \varepsilon'_2 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2} \right) + \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_s &= \left( 3 \cdot 0,018 \cdot 3,224 \frac{5,050 - 3,224}{5,050 + 2 \cdot 3,224} \right) + 3,224 \\ \varepsilon'_s &= 3,252\end{aligned}\tag{37}$$

Böttcherův vztah:

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_s} &= 3 \nu_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_s} \\ \varepsilon'_s (\varepsilon'_1 + 2 \varepsilon'_s - 2 \varepsilon'_2 - 3 \nu_1 \varepsilon'_2 + 3 \nu_1 \varepsilon'_2) - \varepsilon'_1 \varepsilon'_2 &= 0 \\ \varepsilon'_s (5,050 + 2 \varepsilon'_s - 2 \cdot 3,224 - 3 \cdot 0,018 \cdot 5,050 + 3 \cdot 0,018 \cdot 3,224) - 5,050 \cdot 3,224 &= 0 \\ 2 \varepsilon'^2_s - 1,495 \varepsilon'_s - 16,284 &= 0 \\ \varepsilon'_s &= 3,252\end{aligned}\tag{38}$$

Tab. 7: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 4% podílem slídy.

| 4% podíl slídy                    |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| 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                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,252                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 9            | 3,252                     | 3,141                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,257                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,246                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,251                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,252                     |                         |

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

| 8% podíl slídy                    |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| 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                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,279                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 9            | 3,279                     | 3,247                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,289                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,266                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,276                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,279                     |                         |

Tab. 9: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 12% podílem slídy.

| 12% podíl slídy                   |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 8            | 3,311                     | 3,313                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,327                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,291                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,307                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,311                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 9            | 3,311                     | 3,313                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,327                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,291                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,307                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,311                     |                         |

***Vypočtené hodnoty směsných vztahů pro vzorky z laku DOLPHON XL 2102 plněného mikromletou slídou***

Tab. 10: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 2% podílem slídy.

| 2% podíl slídy                    |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 2            | 3,800                     | 3,811                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,801                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,798                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,799                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,800                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 3            | 3,800                     | 3,809                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,801                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,798                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,799                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,800                     |                         |

Tab. 11: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 4% podílem slídy.

| 4% podíl slídy                    |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 2            | 3,809                     | 3,814                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,811                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,806                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,808                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,809                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 3            | 3,809                     | 3,826                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,811                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,806                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,808                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,809                     |                         |

Tab. 12: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 6% podílem slídy.

| 6% podíl slídy                    |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 2            | 3,820                     | 3,841                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,823                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,815                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,819                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,820                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 3            | 3,820                     | 3,824                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,823                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,815                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,819                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,820                     |                         |

Tab. 13: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 8% podílem slídy.

| 8% podíl slídy                    |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 2            | 3,837                     | 3,851                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,842                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,830                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,835                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,837                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 3            | 3,837                     | 3,859                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,842                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,830                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,835                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,837                     |                         |

**Vypočtené hodnoty směsných vztahů pro vzorky z laku DOLPHON XL 2102 plněného nanočásticemi SiO<sub>2</sub>**

Hodnota relativní permitivity SiO<sub>2</sub> na kmitočtu 0,9 MHz je 3,9. Z tohoto důvodu byl pro výpočet směsných vztahů lakových vzorků plněných nanočásticemi vybrán kmitočet 0,9 MHz. Pro tento kmitočet byly vypočteny hodnoty relativních permitivit vzorků s různým obsahem SiO<sub>2</sub>.

Tab. 14: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 1% podílem SiO<sub>2</sub>.

| 1% podíl SiO <sub>2</sub>         |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 2            | 3,034                     | 3,726                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,035                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,033                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,034                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,034                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 3            | 3,034                     | 3,610                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,035                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,033                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,034                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,034                     |                         |

Tab. 15: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 2% podílem SiO<sub>2</sub>.

| 2% podíl SiO <sub>2</sub>         |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 2            | 3,039                     | 3,794                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,040                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,038                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,038                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,039                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 3            | 3,039                     | 3,914                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,040                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,038                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,038                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,039                     |                         |

Tab. 16: Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity lakových vzorků s 3% podílem SiO<sub>2</sub>.

| 3% podíl SiO <sub>2</sub>         |              |                           |                         |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| metoda výpočtu                    | vzorek číslo | vypočtené $\epsilon'$ (-) | změřené $\epsilon'$ (-) |
| Maxwellův vztah                   | 2            | 3,042                     | 3,648                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,043                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,040                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,041                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,042                     |                         |
| Maxwellův vztah                   | 3            | 3,042                     | 3,568                   |
| Lichteneckerův vztah pro $k = 1$  |              | 3,043                     |                         |
| Lichteneckerův vztah pro $k = -1$ |              | 3,040                     |                         |
| Lichteneckerův logaritmický vztah |              | 3,041                     |                         |
| Böttcherův vztah                  |              | 3,042                     |                         |

## 2.7 Matematická interpretace pomocí Havriliak-Negamiho funkce

Relaxační maxima se v námi měřeném kmitočtovém rozsahu 100 Hz - 2 MHz u většiny vzorků nevyskytovala. Vyskytovala se pouze u kmitočtových závislostí ztrátového čísla lakových vzorků s různým plněním slídou a měnící se relativní vlhkostí 55 % a 75 %. Na ukázkou byly naměřené průběhy dvou vzorků s 12% plněním slídou a relativní vlhkostí 55 % a 75 % při teplotě 30 °C proloženy (fitovány) v programu MS Excel, odkud byly odečteny koeficienty distribuční funkce Havriliak-Negamiho rozdělení, jež vyjadřuje vztah (6). Koeficienty jsou uvedeny v tab. 17, kde  $\Delta\epsilon$  je intenzita relaxace,  $\tau_0$  poloha relaxačního maxima,  $\alpha$  šířka relaxačního maxima,  $\beta$  asymetrie relaxačního maxima. Při prokládání (fitování) průběhů bylo počítáno s průběhy od kmitočtu 317 Hz, jelikož při nižších kmitočtech

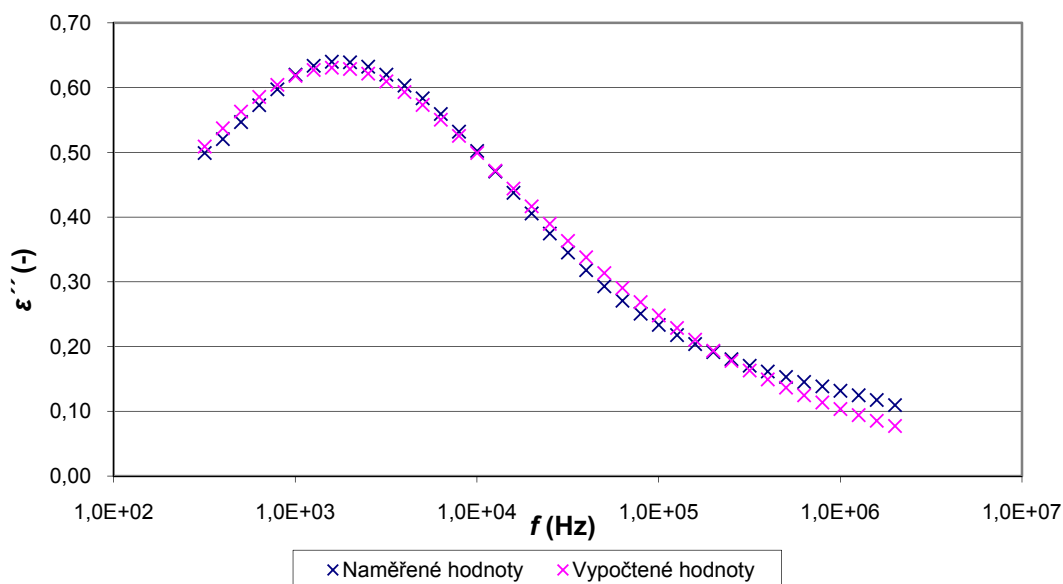
se v naměřených průbězích projevovala vodivostní složka, se kterou se ve vztahu nepočítalo a docházelo by tedy k chybě výpočtů koeficientů distribuční funkce.

Tab. 17: Koeficienty Havriliak-Negamiho distribuční funkce pro lakový vzorek s 12% podílem slídy při teplotě 30 °C.

| Relativní vlhkost 55 % |                         |              |             |                      |
|------------------------|-------------------------|--------------|-------------|----------------------|
| vzorek číslo           | $\Delta\varepsilon$ (-) | $\alpha$ (-) | $\beta$ (-) | $\tau_0$ (-)         |
| 8                      | 1,40                    | 0,570        | 0,830       | $1,28 \cdot 10^{-4}$ |
| 9                      | 2,21                    | 0,070        | 0,330       | $9,90 \cdot 10^{-5}$ |
| Relativní vlhkost 75 % |                         |              |             |                      |
| vzorek číslo           | $\Delta\varepsilon$ (-) | $\alpha$ (-) | $\beta$ (-) | $\tau_0$ (-)         |
| 8                      | 6,20                    | 0,150        | 0,372       | $3,50 \cdot 10^{-4}$ |
| 9                      | 3,81                    | 0,100        | 0,321       | $7,00 \cdot 10^{-5}$ |

V tab. 17 je vidět, že hodnota parametru  $\Delta\varepsilon$  charakterizující intenzitu relaxace s vyšší relativní vlhkostí vzrůstá. Parametr  $\alpha$  se mění různě podle šířky relaxačních maxim jednotlivých průběhů pro různé relativní vlhkosti. Se zvyšující relativní vlhkostí dochází ke změnám asymetrie křivek, které určuje parametr  $\beta$ . Poloha relaxačního maxima  $\tau_0$  je odlišná pro jednotlivé průběhy vzorků a relativní vlhkosti.

Na obr. 36 jsou ukázány kmitočtové závislosti naměřených a vypočtených hodnot ztrátového čísla lakového vzorku s 12% podílem mikromleté slídy při relativní vlhkosti 55 % a teplotě 30 °C. Z obrázku je patrné, že oba průběhy se od sebe liší minimálně.



Obr. 36: Kmitočtové závislosti naměřených a vypočtených hodnot ztrátového čísla lakového vzorku s 12% podílem mikromleté slídy s teplotou 30 °C a relativní vlhkostí 55 %.

### 3 Závěr

Cílem diplomové práce, který se podařilo splnit, bylo vytvoření rešerše o vlivu plniv v podobě mikro- a nanočástic na elektrické vlastnosti kompozitních izolačních materiálů. Byly připraveny sady zkušebních vzorků s různým hmotnostním plněním, buď mikromleté slídy, nebo oxidu křemičitého v podobě nanoplňiva. Na sadě zkušebních lakových vzorků s různým hmotnostním podílem mikromleté slídy byl prošetřen a vyhodnocen vliv teploty a relativní vlhkosti na složky komplexní permitivity složených lakových materiálů s ohledem na podíl plniva. Na další sadě vzorků byly porovnány vlastnosti elektroizolačního laku plněného nanočásticemi a mikročásticemi za normálních podmínek. Na naměřené hodnoty byla aplikována matematická interpretace pomocí směšných vztahů.

Bylo zjištěno, že relativní permitivita vysušených lakových vzorků s různým hmotnostním procentem slídy s rostoucím kmitočtem klesá. S rostoucím hmotnostním plněním mikromletou slídou roste relativní permitivita lakových vzorků v řádech desetin. Při zvyšování hodnoty relativní vlhkosti prostředí vzrůstá relativní permitivita lakových vzorků s rostoucím podílem slídy opět 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 navlhat. Při zvyšující se teplotě hodnota relativní permitivity kompozitních materiálů opět stoupá při zachování tendence průběhu. Ztrátová čísla lakových vzorků s rostoucím podílem slídy, s rostoucí teplotou a relativní vlhkostí narůstají, tento nárůst je větší při nižších kmitočtech a u vzorků s vyšším hmotnostním podílem mikromleté slídy se zde projevují jednotlivá relaxační maxima.

Relativní permitivita lakových vzorků vzroste již při přidání 1 % hmotnostního podílu nanočástic  $\text{SiO}_2$  o několik řádů, v porovnání s mikromletou slídou, kde tato změna hodnoty relativní permitivity není tak výrazná při tak malém hmotnostním podílu v lakovém vzorku. S dalším zvyšováním hmotnostního podílu nanočástic  $\text{SiO}_2$  v lakových vzorcích se relativní permitivita příliš nemění. Hodnoty ztrátového čísla lakových vzorků vzrůstají s rostoucím hmotnostním plněním nanočásticemi  $\text{SiO}_2$  v kmitočtovém pásmu 100 Hz až 10 kHz oproti hodnotám lakových vzorků bez plniva. Při přidání 1 % hmotnostního podílu nanočástic  $\text{SiO}_2$  vzroste ztrátové číslo lakových vzorků na hodnotu, které přibližně odpovídá hodnota ztrátového čísla lakových vzorků plněných 8 % slídy. Relaxační maxima se v měřeném kmitočtovém rozsahu 100 Hz - 2 MHz nevyskytovala.

Jako ověření naměřených hodnot byly pomocí směšných vztahů vypočteny hodnoty relativních permitivit pro dané podíly slídy a oxidu křemičitého v lakových vzorcích. Bylo zjištěno, že pro lakové vzorky plněné mikromletou slídou se vypočtené hodnoty příliš neliší od naměřených hodnot, což dokazuje správnost měření a platnost použitých směšných vztahů. Rozdíl mezi oběma výsledky relativních permitivit může být způsoben nerovností lakových vzorků s podílem slídy. Jako nejvhodnější se pro výpočet jevil Lichteneckerův vztah pro

$k = -1$ , rovnice (16). Vzhledem k chaotickému uspořádání laku a slídy ve vzorcích by měl být nejvhodnější Lichteneckerův logaritmický vztah. Rozdíly mezi oběma výsledky jsou však zanedbatelné. Rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami relativních permitivit lakových vzorků plněných oxidem křemičitým jsou dle očekávání velké, jak je patrné z tab. 14 až tab. 16, což potvrzuje, že směsné vztahy jsou nepoužitelné pro nanokompozitní materiály, jak vyplývá z rozboru literárních zdrojů, zabývajících se problematikou nanokompozitních materiálů.

Elektrické vlastnosti lakových vzorků se s hmotnostním podílem plniva v podobě mikro- a nanočástic nezlepšily, nicméně lze očekávat zlepšení z hlediska mechanických vlastností. To se však nepodařilo ověřit vzhledem k absenci pracovišť na měření mechanických vlastností lakových vzorků.

Měření dielektrických veličin bylo ovlivněno nedokonale rovným 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.

Velmi důležitým parametrem při výrobě vzorků, zejména s plnivem v podobě nanočástic, je dokonalé rozptýlení plniva v laku a odplynění směsi připravené k výrobě. Nerovnoměrným rozptylem a hromaděním nanoplňiv, přítomností vzduchových vměstků, případně neúmyslně přimíchanými nečistotami během výroby se výrazně zhoršují dielektrické vlastnosti kompozitního materiálu.

Do budoucna by bylo vhodné vyrobit a proměřit vzorky s vyšším hmotnostním plněním nanočásticemi, popřípadě proměřit a vyhodnotit vliv klimatických podmínek na složky komplexní permitivity složených lakových materiálů s ohledem na podíl plniva.

## 4 Použitá literatura

- [1] Agilent 16451B Dielectric Test Fixture [online]. [cit 2010-12-3]. Dostupný z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=1000000046%3Aepsg%3Apro&pageMode=OV&cc=US&lc=eng>>
- [2] Agilent E4980A Precision LCR Meter – *Operation Manual*. Yokogawa – Hewlett – Packard LTD 1989.
- [3] Agilent E4980A Precision LCR Meter [online]. [cit 2011-3-1]. Dostupný z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=715495&pageMode=OV&cc=US&lc=eng>>
- [4] Agilent VEE Pro [online]. [cit 2011-3-4]. Dostupný z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/W1140-90036.pdf>>
- [5] ARCO technik s.r.o. [online]. [cit 2011-2-21]. Dostupný z WWW: <[http://www.arco.cz/datlisty/EpoxyLite\\_prehled\\_pouziti%20\\_soubory/..%5CEpoxyLite%20TSA%20220S.pdf](http://www.arco.cz/datlisty/EpoxyLite_prehled_pouziti%20_soubory/..%5CEpoxyLite%20TSA%20220S.pdf)>
- [6] BOČEK, J., MENTLÍK, V. *Aspekty užití nanokompozitních dielektrik*. Plzeň: Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 2010-11-05]. Dostupné z WWW: <<http://ketsy.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/95.pdf>>
- [7] CAO, Y., IRWIN, P., C., YOUNSI, K., The Future of Nanodielectrics in the Electrical Power Industry . In *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. Vol. 11, No. 5. October 2004, s. 797 – 807. ISSN 1070-9878.
- [8] CHUJO, K., *Advanced technology and Application of Polymer Nano-Composite*. CMC Press. pp. 1-240. 2001 (in Japanese).
- [9] *Definice, rozdělení a historie kompozitních materiálů* [online]. [cit 2010-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.volny.cz/zkoriek/historie.pdf>>
- [10] FORTRAC s.r.o. [online]. [cit 2011-2-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.fortrac.cz/index.php?nav=katalog>>
- [11] FOTERGILL, J., C., NELSON, J., K., FU, M. Dielectric Properties of Epoxy Nanocomposites containing TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnO fillers. *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, pp 406-409, 2004.
- [12] *Historie moderních technologií* [online]. [cit 2010-11-14]. Dostupný z WWW: <[http://nanotechnologie.vsb.cz/Historie/nano\\_historie.pdf](http://nanotechnologie.vsb.cz/Historie/nano_historie.pdf)>
- [13] 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.

- [14] KAZELLE, J., JIRÁK, J., VANĚK, J., LIDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M., HAVLÍČEK, S., *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 273 stran.
- [15] *Kompozity* [online]. [cit 2010-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>>
- [16] MENTLÍK, V., *Dielektrické prvky a systémy*. BEN - technická literatura, 2006, 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [17] MRKOS, P. *Vliv obsahu slídy na elektrické vlastnosti impregnačních laků*. [Semestrální projekt 2]. FEKT VUT Brno, 2009.
- [18] *Nanotechnologie na VŠB-TUO* [online]. [cit 2010-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://nanotechnologie.vsb.cz/>>
- [19] NOVÁK, P. *Analýza vlastností lakových kompozitů v průběhu navlhání*. [Bakalářská práce]. FEKT VUT Brno, 2009.
- [20] SIGMA-ALDRICH. *Silica Nanopowder, 10-20 nm particle size (TEM), 99,5% trace metals basis*. [cit. 2010-4-03]. Dostupné z WWW: <[http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?N4=637238|ALDRICH&N5=SEARCH\\_CONCAT\\_PNO|BRAND\\_KEY&F=SPEC](http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?N4=637238|ALDRICH&N5=SEARCH_CONCAT_PNO|BRAND_KEY&F=SPEC)>
- [21] SINGHA, S., THOMAS, J. Permittivity and Tan Delta Characteristics of Epoxy Nanocomposites in the Frequency Range of 1MHz-1GHz. In *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. Vol. 15, No. 1. February 2008, s. 2 – 12. ISSN 1070-9868
- [22] SUN, L.M., SAKAMOTO T., UETA S., KOGA K., TAKAYANAGI M., *Additive effect on Thermotropic Liquid Crystal Polymer Al-loys. Effect of Third Component of Thermotropic Liquid Crystal Polymer on Mechanical Properties of Vectra A-Reinforced Polycarbonate*. Polymer J., Vol. 26, pp. 939-952. 1994.
- [23] SÝKORA, R., *Úvod do vlhkosti plynů*. 2006. 32 stran.
- [24] TANAKA, T., *Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties*. In *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. Vol. 12, No. 5. October 2005. ISBN 1070-9878/05.
- [25] TANAKA, T., MONTANARI, G.C., MÜLHAUPT, R., *Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications*. In *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. Vol. 11, No. 5. October 2004. S 763-784. ISBN 1070-9878.

- [26] WINDLASS, H., RAJ, P., M., BALARAMAN, S., BHATTACHARYA, S., K., TUMMALA, R., R. Polymer Ceramic Nanocomposite Capacitors for System-On-Package (SOP) Applications. *IEEE Trans. Advanced Packaging*. Vol. 26, pp 10-16, 2003.

## 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<br>tříelektrodového systému |
| $d_m$                                 | (m)                  | průměr měřicí elektrody   |
| $E$                                   | (V m <sup>-1</sup> ) | intenzita elektrického pole   |
| $e$                                   | (C)                  | elementární náboj   |
| $f$                                   | (Hz)                 | kmitočet  |
| $h$                                   | (m)                  | tloušťka vzorku   |
| $J_p$                                 | (A m <sup>-1</sup> ) | povrchová proudová hustota  |
| $l$                                   | (m)                  | délka částice plniva  |
| $M_{\text{H}_2\text{O}}$              | (kg)                 | hmotnost vodní páry   |
| $M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$ | (kg)                 | hmotnost nasycené vodní páry  |
| $M_{\text{vp}}$                       | (kg)                 | celková hmotnost vlhkého plynu  |
| $M_{\text{sp}}$                       | (kg)                 | hmotnost suchého plynu  |
| $m$                                   | (kg)                 | hmotnost  |
| $m_p$                                 | (%)                  | hmotnostní plnění   |
| $n$                                   | (m <sup>-3</sup> )   | koncentrace nosičů elektrického náboje  |
| $\vec{P}$                             | (C m <sup>-2</sup> ) | vektor polarizace   |
| $s$                                   | (-)                  | směšovací poměr   |
| $t$                                   | (m)                  | tloušťka částice plniva   |
| $\text{tg } \delta$                   | (-)                  | ztrátový činitel  |
| $\rho$                                | ( $\Omega$ m)        | rezistivita   |
| $V$                                   | (m <sup>3</sup> )    | objem   |

|                                |   |  |
|--------------------------------|---|--|
| $\alpha$                       | ( - )   | šířka relaxačního maxima   |
| $\beta$                        | ( - )   | asymetrie křivky relaxačního maxima                              |
| $v_1$                          | ( - )   | objemový podíl elektroizolačního laku                            |
| $v_2$                          | ( - )   | objemový podíl slídy   |
| $\gamma$                       | (S m <sup>-1</sup> )                              | konduktivita   |
| $\gamma_p$                     | (S)   | povrchová konduktivita   |
| $\gamma_v$                     | (S m <sup>-1</sup> )                              | vnitřní konduktivita   |
| $\tau_0$                       | ( s )   | poloha relaxačního maxima  |
| $\delta$                       | (rad)   | ztrátový úhel  |
| $\varepsilon_\infty$           | ( - )   | optická permitivita  |
| $\varepsilon' = \varepsilon_r$ | ( - )   | relativní permitivita (reálná složka komplexní permitivity)      |
| $\varepsilon''$                | ( - )   | ztrátové číslo (imaginární složka komplexní permitivity)         |
| $\varepsilon^*$                | ( - )   | komplexní permitivita  |
| $\varepsilon_s$                | ( - )   | statická permitivita   |
| $\varepsilon_0$                | (F m <sup>-1</sup> )                              | permitivita vakua (8,854 . 10 <sup>-12</sup> F m <sup>-1</sup> ) |
| $\mu$                          | (m <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ) | driftová pohyblivost   |
| $\mu_i$                        | (C m)   | indukovaný dipólový moment                                       |
| $\phi$                         | (kg m <sup>-3</sup> )                             | absolutní vlhkost  |
| $\phi_m$                       | (%)   | měrná vlhkost  |
| $\phi_{nas}$                   | (kg m <sup>-3</sup> )                             | absolutní vlhkost vzduchu při nasycení vodní párou               |
| $\varphi$                      | (%)   | relativní vlhkost  |
| $\mathcal{G}$                  | (°C)  | teplota  |