

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

# DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TERMOPLASTŮ PLNĚNÝCH MLETOU SLÍDOU

DIELECTRIC PROPERTIES OF THERMOPLASTIC MATERIALS WITH GROUND MICA

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. IVO FIALA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. HELENA POLSTEROVÁ, CSc.

BRNO 2008



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektrotechnická výroba a management

**Student:** Fiala Ivo, Bc.

**Ročník:** 2

**ID:** 47512

**Akademický rok:** 2007/08

**NÁZEV TÉMATU:**

**Dielektrické vlastnosti termoplastů plněných mletou slídou**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s problematikou kompozitních materiálů.

Na vzorky termoplastů plněných mletou slídou aplikujte metodu dielektrické relaxační spektroskopie.

Sledujte vliv plnění, teploty a vlhkosti na měřené veličiny.

Naměřené výsledky vyhodnoťte.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 11.2.2008

**Termín odevzdání:** 30.5.2008

**Vedoucí projektu:** Ing. Helena Polsterová, CSc.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

*předseda oborové rady*



**UPOZORNĚNÍ:**

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

# Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Ivo Fiala  
Bytem: Sportovní 578, 59231, Nové Město na Moravě  
Narozen: 28.4.1983, Nové Město na Moravě  
(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
Ing. Zdenka Rozsivalová  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Dielektrické vlastnosti termoplastů plněných mletou slídou

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

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

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

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

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

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

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

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

V Brně dne: 29.5. 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## Abstrakt:

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou kompozitních materiálů, měřením jejich dielektrických vlastností, konkrétně polyamidu a polyamidu plněného různým hmotnostním procentem mleté slídy. Základním zaměřením práce je určení metodiky měření a vlastní měření základních dielektrických veličin materiálů, jako jsou ztrátový činitel a složky komplexní permitivity. Měření mají probíhat pro různé kombinace teplot a vlhkostí. V práci je uvedeno fyzikální objasnění naměřených závislostí.

## Abstract:

The subject of this thesis are composite materials, measuring of their dielectric qualities, particularly of the polyamide and the polyamide filled with various weight percentage of the ground mica. The essential intent of the thesis is to determine the measuring methodology and respective measurement of the basic dielectrical quantities of materials, as are loss factor and the complex permittivity components. The measuring should be done for various temperature and humidity combinations. The thesis contains the physical explanation of measured dependences.

## Klíčová slova:

Kompozity, termoplasty, slída, dielektrické vlastnosti, ztrátový činitel, komplexní permitivita, teplota, vlhkost.

## Keywords:

Composites, thermoplast, mica, dielectric qualities, loss factor, complex permittivity, temperature, humidity.

## Bibliografická citace díla:

FIALA, I. *Dielektrické vlastnosti termoplastů plněných mletou slídou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Helena Polsterová, CSc.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

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

V Brně dne: 29.5. 2008

.....

## Poděkování:

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

## OBSAH

<b>Přehled použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Teoretická část</b> .....	<b>10</b>
2.1 Kompozitní materiály .....	10
2.1.1 Definice .....	10
2.1.2 Klasifikace kompozitů .....	11
2.1.3 Částicové kompozity .....	12
2.1.4 Přehled kompozitů v elektrotechnice .....	12
2.2 Dielektrika a izolanty .....	14
2.2.1 Elektrické veličiny dielektrik a izolantů .....	15
2.2.2 Dielektrická polarizace .....	16
2.3 Polarizační mechanismy .....	17
2.3.1 Pružné polarizace .....	18
2.3.2 Relaxační polarizace .....	18
2.3.3 Popis mechanismu relaxační polarizace .....	19
2.4 Permitivita a ztrátový činitel dielektrických a izolačních materiálů .....	21
2.4.1 Permitivita ve statickém elektrickém poli .....	21
2.4.2 Permitivita ve střídavém elektrickém poli .....	22
2.4.3 Ztrátový činitel .....	23
2.4.4 Příspěvky jednotlivých druhů polarizací k permitivitě dielektrik .....	24
2.5 Ztráty v dielektriku .....	25
2.5.1 Dielektrické ztráty nehomogenních materiálů .....	28
2.6 Činitelé klimatu .....	28
2.6.1 Teplota .....	28
2.6.2 Vlhkost vzduchu .....	29
Absolutní vlhkost vzduchu .....	29
Relativní vlhkost vzduchu .....	29
2.6.3 Současné působení klimatických činitelů .....	30
2.6.4 Navlhavost látek .....	31
2.7 Teorie složené soustavy .....	32
2.7.1 Permitivita složené soustavy .....	33
<b>3 Experimentální část</b> .....	<b>36</b>
3.1 Materiály použité při výrobě vzorků .....	36
3.2 Experimentální vzorky .....	38
3.3 Měření složek komplexní permitivity .....	38
3.3.1 Elektrodotový systém .....	38
3.3.2 Měření v horkovzdušném sterilizátoru .....	40
3.3.3 Měření pomocí systému Tettex 2904 .....	40
3.3.4 Měření v klimatické komoře Climacell 111 .....	41
3.4 Výsledky měření .....	44
3.4. Vyhodnocení měření .....	56
<b>4 Závěr</b> .....	<b>58</b>
<b>5 Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>59</b>

## Přehled použitých symbolů a zkratek

$C$	kapacita	(F)
$C_0$	geometrická kapacita	(F)
$D$	elektrická indukce	(C.m <sup>-2</sup> )
$E$	intenzita elektrického pole	(V.m <sup>-1</sup> )
$E_p$	elektrická pevnost	(V.m <sup>-1</sup> )
$P$	vektor polarizace	(C.m <sup>-2</sup> )
$P_z$	ztrátový výkon	(W)
$S_{ef}$	efektivní plocha měřicí elektrody	(m <sup>2</sup> )
$T$	termodynamická teplota	(K)
$W$	velikost potenciálové bariéry	(kJ.mol <sup>-1</sup> )
$c$	šířka mezikruží mezi ochranou a měřicí elektrodou	(m)
$d$	průměr měřicí elektrody	(m)
$f$	frekvence	(Hz)
$h$	tloušťka vzorku	(m)
$k$	Boltzmanova konstanta	(J.K <sup>-1</sup> )
$n$	koncentrace indukovaných dipólových momentů	(m <sup>-3</sup> )
$tg \delta$	ztrátový činitel	(-)
$\alpha$	polarizovatelnost	(F.m <sup>2</sup> )
$\delta$	ztrátový úhel	(°)
$\varepsilon$	permitivita	(F.m <sup>-1</sup> )
$\varepsilon_0$	permitivita vakua	(F.m <sup>-1</sup> )
$\varepsilon_r$	relativní permitivita	(-)
$\kappa$	dielektrická susceptibilita	(-)
$\mu$	indukovaný dipólový moment	(C.m)
$\rho_p$	povrchová rezistivita	(Ω)
$\rho_v$	vnitřní rezistivita	(Ω.m)
$\tau$	časová konstanta	(s)
$\varphi$	relativní vlhkost vzduchu	(%)
$\phi$	absolutní vlhkost vzduchu	(kg.m <sup>-3</sup> )
$\omega$	úhlová frekvence	(rad.s <sup>-1</sup> )



# 1 Úvod

V současné době, kdy se zvyšují požadavky především na kvalitu a využití materiálů, se lze setkat s problematikou zvýšených nároků na dielektrické vlastnosti částí elektrických přístrojů nebo zařízení.

Kompozitní materiály mají již své, často nezastupitelné místo, které si získaly svojí schopností kombinovat požadované vlastnosti (elektrické, mechanické, tepelné) přesně podle potřeby dané aplikace. Díky kompozitům je možné vytvořit produkt s takovými parametry, které jsou při použití tradičních materiálů nedosažitelné. Z hlediska rozvoje používání kompozitních materiálů je důležitá potřebná znalost jejich stavby, užitných vlastností, chování v podmínkách zatěžování, znalost způsobu zpracování a měření vlastností.

Úkolem této práce je určit základní dielektrické vlastnosti sledovaného materiálu a analyzovat jejich změny při působení zvýšené vlhkosti a teploty. K tomuto účelu byly použity sady vzorků polyamidu PA6 plněného různým hmotnostním procentem mleté slídy.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Kompozitní materiály

#### 2.1.1 Definice

Kompozity jsou složené materiály vytvořené člověkem představující soustavu, složenou soustavu nebo směsnou soustavu. Ta je tvořena makroskopickými útvary dvou či více materiálových složek, které mají odlišné chemické složení a zároveň různé vlastnosti (chemické, fyzikální, elektrické, atd.). Geometrické útvary jednotlivých složek jsou rozprostřeny v celém objemu kompozitu [1].

Kompozitní materiály se používají místo jednoduchých materiálů především z těchto důvodů [1]:

- a) dosažení výhodnějších mechanických vlastností (zvýšení pevnosti v tahu, pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v tahu, pevnosti v ohybu rázem, tuhosti, tvrdosti)
- b) dosažení vyšší tvarové stability
- c) dosažení výhodnějších tepelných vlastností (zvýšení tepelné vodivosti, trvalé tepelné odolnosti, odolnosti proti žáru, odolnosti proti tepelným rázům, modifikace délkové a objemové roztažnosti)
- d) omezení hořlavosti
- e) zvýšení chemické odolnosti
- f) zmenšení smrštění a zamezení vzniku dutin a prasklin
- g) zmenšení nasákavosti
- h) zlepšení vzhledu povrchu, zejména u výlisků
- i) snížení výrobních nákladů
- j) modifikace elektrických (dielektrických) či magnetických vlastností

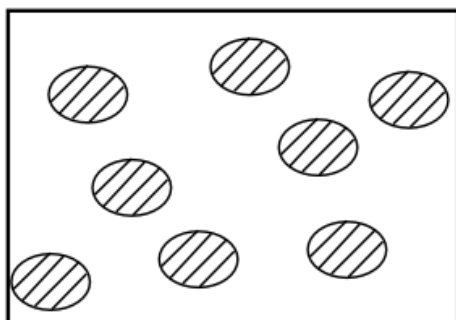
Míra vlastností, které jsou od kompozitního materiálu očekávány, je především závislá na vlastnostech materiálů složek. Výsledné vlastnosti jsou dále výrazně ovlivňovány množstvím jednotlivých složek v soustavě, geometrickým tvarem částic složek, jejich orientací, uspořádáním a rozložením v soustavě. Na mechanické vlastnosti mají podstatný vliv chemické či fyzikální pochody na hranicích složek, k nimž může docházet buď při výrobě složeného materiálu nebo při jeho využívání [1][6].

## 2.1.2 Klasifikace kompozitů

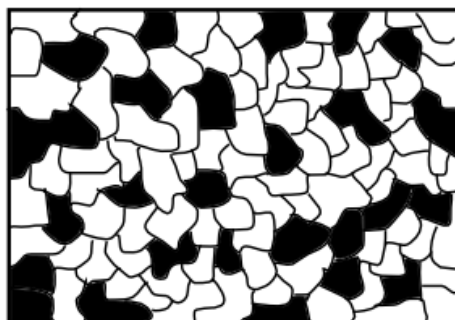
### 1. Matriční a statistické kompozity - složené soustavy

Podle způsobu vzájemného uspořádání a rozdělení částic jednotlivých složek v soustavě můžeme kompozity rozlišit na [1]:

- a) kompozity matričního typu
- b) kompozity statistického typu



a)



b)

**Obr.1:** matriční a) a statistická b) složená soustava v řezu

### 2. Kompozity - složené materiály a geometrický tvar částic

Podle tvaru částic, které tvoří složenou soustavu je možné rozlišovat [1]:

1. vrstevnaté kompozity
  - a) s objemově uloženými vrstvami
  - b) s povrchově uloženými vrstvami
2. kompozity s vláknitými plnivými
  - a) s dlouhými vlákny
  - b) s krátkými vlákny
3. kompozity plněné částicemi, částicové kompozity
  - a) s částicemi o velikosti řádu 1  $\mu\text{m}$  a větší
  - b) s částicemi o velikosti řádu 1  $\mu\text{m}$  a menší

### 3. Izotropní a anizotropní kompozity

Vlastnost soustavy v určitém směru je možné zesílit nebo naopak potlačit volbou vhodného druhu soustavy, materiálů složek, ale také volbou geometrického tvaru částic v soustavě [1].

#### 2.1.3 Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou ty, jejichž výztuží jsou nevláknité částice, jejich rozměry se ve všech směrech příliš neliší a jsou většinou vyrobeny mikromletím anorganických materiálů. Částice mohou mít tvar kulový, krychlový, čtyřstěnný, destičkový, popřípadě jiný. Vložení různých částic (křemenná moučka, slída, kaučuk, atd.) do plastové matrice je možné výrazně zvýšit mechanické vlastnosti kompozitu (tvrdost, odolnost proti opotřebení, modul pružnosti v tahu), fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, žáruvzdornost, tvarovou stálost za tepla), dielektrické vlastnosti (permitivita, ztrátový činitel) i vlastnosti chemické. Částice mohou mít příznivý účinek na napjatost, která vzniká jako důsledek polymeračního smrštění nebo změn teplot [3].

#### 2.1.4 Přehled kompozitů v elektrotechnice

##### a) Zpevňující částice a vlákna – plniva

Plniva se používají ke zlepšení vlastností (elektrických, mechanických, atd..) výsledného kompozitního materiálu. Plniva mohou být částice s velmi malými rozměry od několika nanometrů až po částice s makroskopickými rozměry. V další části je uveden stručný přehled nejpoužívanějších plniv v elektrotechnice.

- Anorganická prášková plniva – vlastnosti práškových plniv lze charakterizovat jako izotropní, používají se tyto materiály:
  - mletý křemen, mastek, živec, mletá slída a břidlice, křemenná a mramorová moučka, kaolin, bentonit, křída, hydratovaný oxid hlinitý, srážený uhličitan vápenatý
  - při zvláštních požadavcích: titaničitan barnatý, křemičitan zirkoničitý, mleté ferity, saze, kovové prášky (karbonylové železo, hliník).
- Organická prášková plniva – používají se částicová plniva na bázi celulózy, nevýhodou těchto plniv je zvyšování hořlavosti výsledného kompozitu.
- Anorganické přírodní vláknité materiály - azbestová vlákna chryzotilového nebo krokydolitového typu.

- Organické přírodní vláknité materiály – celulóza ve formě vláken.
- Anorganické vláknité monokrystaly:
  - whiskry (vousy) – jedná se o jehlovité či niťovité mechanicky vysoce pevné monokrystaly anorganických látek, které mají poměr délky k průměru v rozmezí 150 až 2 500 (délka vláken je řádově  $10^{-3}$  m, průměr vláken je zpravidla několik mikrometrů )
  - monokrystaly karbidu křemíku (SiC) a safíru ( $\alpha$ -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
- Anorganická polykrystalická vlákna - synteticky vyráběná vlákna tvořená krystality, jejichž rozměry jsou o hodně menší než průřez vlákna, mají strukturu dobře slinuté nepórovité keramiky s neorientovanými zrny, vyrábějí se nejčastěji z pevných, těžkotavitelných a chemicky i mechanicky odolných látek (oxid hlinitý, spinel, oxid hlinitý s oxidem lithným, křemičitan zirkoničitý, oxid zirkoničitý, nitrid bóru, uhlík, grafit).
- Organické syntetické vláknité materiály – především plastová vlákna.
- Skleněná vlákna – používají se vlákna kruhového průřezu různých průměrů (velejemné průměr 0,2 - 1,5  $\mu\text{m}$ , středně jemné 2,5 - 3,5  $\mu\text{m}$ , jemné 4,0 - 10  $\mu\text{m}$ , hrubé cca 15  $\mu\text{m}$ , tlusté 25 - 250  $\mu\text{m}$ ), ale existují i vlákna s jinými profily, základem je sklo E (bezalkalické hlinitoboritokřemičité sklo).
- Uhlíková a borová vlákna – tato vlákna se získávají pyrolýzou z viskózních nebo polyakrylonitrilových vláken při teplotách 1600 - 3000 °C.
- Kovová vlákna [1][3].

## **b) Hlavní druhy kompozitů pro elektrotechniku**

- Plasty a elastomery s anorganickými práškovými plnivy – používají se termoplastové, reaktoplastové (fenoplasty, aminoplasty, epoxidové a polyesterové pryskyřice, silikony) a elastomerní matrice.
- Plasty zpevněné anorganickými vlákny:
  - termoplasty zpevněné anorganickými vlákny
  - reaktoplasty zpevněné anorganickými vlákny - lamináty (jsou tvořené proimpregnovanými, paralelně uloženými vrstvami vláknitých polotovarů), faolit (lisovací materiály na bázi fenolformaldehydových pryskyřic s azbestovými vlákny, výhodou je kyselinovzdornost), prepregy (plasty

zpevněné vlákny a nacházející se v polovytvrzeném stavu, pro výrobu se používají vhodné epoxidové nebo polyesterové pryskyřice, které umožňují výrobu izolací (navíjením), premixy (lisovací materiály na podkladě epoxidových a polyesterových pryskyřic).

- Kovy zpevněné anorganickými vlákny – vlákna se používají za účelem vyztužování kovů, vlákna mohou být: skleněná (E – sklo, křemenné sklo), polykrystalická ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , grafit), monokrystalická (grafit).
- Anorganické práškové složené materiály – cermety (heterogenní složená soustava kovů nebo jejich slitin s jednou nebo několika keramickými složkami, podíl kovů v soustavě je 15 až 85 % objemových, keramickou složkou mohou být karbidy, boridy nebo oxidy, kovovou složkou je často nikl, popř. jeho slitiny) [1].

## 2.2 Dielektrika a izolanty

Materiály používané v elektrotechnických aplikacích je možné rozdělit zpravidla několika způsoby. Základním hlediskem jsou informace o jejich struktuře, tedy například využití poznatků o vazbách, jimiž vznikly a jsou tvořeny (kovalentní, iontová, Van der Waalsova vazba), a které mají pro charakter látky zásadní význam. Další hledisko představuje skupenství, ve kterém se daná látka nachází, a třetí hledisko představují vlastnosti nosičů elektrických nábojů (volné nebo vázané nosiče), které jsou v materiálu přítomny.

To, jak se látky budou po vložení do vnějšího elektrického pole chovat, závisí především na druhu nosičů náboje a také na jejich koncentraci. Obecně lze říci, že přiložení elektrického pole způsobí pohyb elektrických nábojů. Reálné materiály je možné rozdělit podle koncentrace (množství) volných nosičů náboje, tedy podle hodnoty jejich měrné elektrické vodivosti (konduktivity). Tato veličina popisuje schopnost látky vést elektrický proud. Látky lze podle hodnoty konduktivity rozdělit následovně [2]:

**Tab.1:** Rozdělení látek podle velikosti konduktivity

Látka	konduktivita ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )
Vodič	$> 10^5$
Polovodič	$10^{-8}$ až $10^5$
Izolant	$< 10^{-9}$

Nosičem náboje jsou částice jako například ionty nebo elektrony, které nesou elementární náboj  $q$ . Rozhodující je míra volnosti jejich pohybu, nosiče lze rozdělit na volné nebo vázané podle velikosti vazebních sil ve struktuře látky. Materiály s velkou vodivostí mají vysokou koncentraci volných nosičů náboje, které se mohou pohybovat strukturou materiálu. Jedná se o volné ionty vznikající štěpením molekul nečistot, někdy štěpením molekul vlastní látky. Volné nosiče podstatně ovlivňují elektrickou vodivost látek. Vodivost je pro tyto látky charakteristická, po vložení do vnějšího elektrického pole se bude jinak chovat látka elektricky vodivá, jinak polovodič a pochopitelně jinak dielektrikum (resp. izolant). Vázané nosiče náboje jsou naopak pevně drženy v blízkosti svých rovnovážných poloh, po přiložení elektrického pole reagují jen určitým posuvem (natočením), ale ne pohybem na velké vzdálenosti odpovídající několikanásobku mřížkové konstanty.

Reálný izolant má vždy určitou měřitelnou vodivost, ta je způsobena malým množstvím volných nosičů obsažených v izolantu. Zařazení daného materiálu do příslušné skupiny (vodič, polovodič, dielektrikum) je dále ovlivňováno vnějšími podmínkami (teplotou, tlakem, frekvencí přiloženého napětí a intenzitou působícího elektrického pole), kterým je daný materiál vystaven.

Dielektrikum je látka se schopností polarizace, to znamená, že po vložení do elektrického pole vytváří vlastní vnitřní elektrické pole. Izolant je materiál, který má zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Jedná se o vzájemné odizolování těchto míst, izolanty tedy brání průchodu proudu, proto jsou označovány jako pasivní prvky. I přes tyto rozdíly spolu izolanty a dielektrika úzce souvisí, dielektrikum je obecnější pojem než izolant. Každý izolant je dielektrikem, ale každé dielektrikum není izolantem (izolanty jsou podmnožinou dielektrik) [2].

### 2.2.1 Elektrické veličiny dielektrik a izolantů

Základními elektrickými veličinami dielektrických a izolačních materiálů jsou [1][2] :

- permitivita  $\epsilon'$  (-), (komplexní permitivita  $\epsilon^*(j\omega) = \epsilon'(\omega) - j.\epsilon''(\omega)$ )
- vnitřní rezistivita  $\rho_v$  ( $\Omega.m$ )
- povrchová rezistivita  $\rho_p$  ( $\Omega$ )
- ztrátový činitel  $tg \delta$  (-)
- elektrická pevnost  $E_p$  ( $V.m^{-1}$ )

## 2.2.2 Dielektrická polarizace

Polarizace je jedním ze základních jevů probíhajících v dielektriku. V okamžiku vložení dielektrika do elektrického pole začíná vzájemná interakce materiálu a pole. V dielektriku začnou probíhat děje nazývané jako polarizační procesy, tyto děje jsou závislé na stavbě a struktuře dané látky. Dielektrická polarizace je fyzikální jev, při němž se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole přemisťují (posouvají) elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových poloh, ale pouze na malé vzdálenosti. Obsahuje-li látka dipólové molekuly (vyznačují se stálým elektrickým momentem), natáčejí se (orientují se) tyto molekuly do směru pole. Výjimečně mohou být i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace. Veličinou, která charakterizuje polarizační jevy z mikroskopického hlediska, je polarizovatelnost. Je značována jako  $\alpha$ . Udává míru změny systému dielektrika ve vnějším poli při polarizování, tedy schopnost polarizace.

Pro velikost indukovaného elementárního dipólového momentu je možné psát [2][7]:

$$\boldsymbol{\mu} = \alpha \cdot \mathbf{E}_L \quad (2.1)$$

kde  $\boldsymbol{\mu}$  je indukovaný dipólový moment částice (C.m)

$$\boldsymbol{\mu} = q \cdot \mathbf{d} \quad (2.2)$$

kde  $q$  je velikost náboje (C)

$\mathbf{d}$  je orientovaná vzdálenost nábojů (m)

$\mathbf{E}_L$  je intenzita pole, která působí v místě dipólu, nazývá se intenzita lokálního pole (respektuje vzájemné interakce částic) ( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$\alpha$  je polarizovatelnost ( $\text{F} \cdot \text{m}^2$ )

Dipólový moment je vektor, který má definovaný směr od záporného náboje ke kladnému.

Pomocí polarizovatelnosti je možné vyjádřit vektor polarizace dielektrika vztahem [2][7]:

$$\mathbf{P} = n \cdot \boldsymbol{\mu} = n \cdot \alpha \cdot \mathbf{E}_L \quad (2.3)$$

kde  $\mathbf{P}$  je vektor polarizace ( $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$n$  je koncentrace (počet) indukovaných dipólových momentů ( $\text{m}^{-3}$ )



Pro vektor polarizace dále také platí vztah [2][7]:

$$\mathbf{P} = \kappa \cdot \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} \quad (2.4)$$

kde  $\kappa$  je dielektrická susceptibilita

Pokud se vyjádří dielektrická susceptibilita vztahem  $\kappa = (\varepsilon_r - 1)$ , je možné pro polarizaci napsat [2]:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} \cdot (\varepsilon_r - 1) \quad (2.5)$$

Porovnáním obou rovnic (2.3 a 2.5) je dosaženo vztahu pro relativní permitivitu dielektrika [2]:

$$\varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} \cdot (\varepsilon_r - 1) = n \cdot \alpha \cdot \mathbf{E}_L \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_r = 1 + n \cdot \alpha \cdot \mathbf{E}_L \cdot \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \mathbf{E}} \quad (2.7)$$

Rovnice 2.7 vyjadřuje vztah makroskopických a mikroskopických veličin a pochopitelně také vztah mezi makroskopickým a mikroskopickým pohledem na chování dielektrika. Rovnice ukazuje, že pro vyjádření relativní permitivity  $\varepsilon_r$  (nej důležitější technická makroskopická charakteristika polarizace dielektrika) na základě mikroskopických veličin je třeba nutně znát souvislosti mezi lokálním vnitřním polem  $E_L$  a vnějším makroskopickým polem  $E$ . Lokální pole  $E_L$  představuje intenzitu elektrického pole přímo v místě konkrétního dipólového momentu, vnitřní pole respektuje vzájemné interakce nosičů elektrického náboje uvnitř dielektrika. Vnější makroskopickým polem  $E$  se rozumí intenzita vnějšího elektrického pole, ta je dána napětím přiloženým na dielektrikum a daným geometrickým uspořádáním elektrod [1] [2].

### **2.3 Polarizační mechanismy**

V dielektrikách se vyskytuje současně několik druhů polarizací, slabší polarizace bývají překryty silnějšími. Podle rychlosti průběhu se polarizace dělí na [1]:

- pružné (elastické) polarizace (jev s rychlým průběhem)
- relaxační polarizace (jev s pomalým průběhem)

### 2.3.1 Pružné polarizace

Nosičem elektrického náboje bývá obvykle elektron nebo iont. Vázané nosiče náboje jsou v atomu, molekule nebo krystalu drženy velmi pevně, po přiložení vnějšího elektrického pole se mohou tyto náboje posunout na zcela minimální vzdálenost ze svých rovnovážných poloh. U elektronové polarizace je tato vzdálenost menší než rozměry samotného atomu. Přestože dochází u pružných polarizací jen k malému posunutí nosičů náboje, je celkové ovlivnění relativní permitivity dielektrika značné, protože dochází k posunutí velkého množství nosičů. Doby ustálení těchto polarizací jsou velmi krátké (většinou  $10^{-16}$  až  $10^{-12}$  sekund) právě z důvodu pevné vazby nosičů. Po ukončení působení elektrického pole dochází podobně rychle k navrácení nosičů náboje do svých rovnovážných poloh. Díky pevné vazbě částic, které se zúčastňují polarizačních dějů, není pohyb nosičů vyvolaný přiloženým elektrickým polem ovlivňován jejich tepelným pohybem. Pohyb nosičů není závislý ani na tlaku nebo frekvenci, tyto polarizace jsou bezeztrátové, což souvisí opět s pevností vazby nosičů. Mezi pružné polarizace patří elektronová, iontová a rezonanční polarizace [1] [2].

### 2.3.2 Relaxační polarizace

Tyto polarizace jsou typické tím, že po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu a při odpojení pole polarizace také pomalu ubývá. Jejich doby potřebné k ustálení jsou relativně dlouhé ( $10^{-12}$  až  $10^{-8}$  sekund u látek nízkomolekulárních, u látek makromolekulárních jsou tyto doby ještě o mnoho řádů vyšší). Na mechanismu těchto polarizací se podílejí slabě vázané částice (resp. molekuly), ale ionty jsou v dotýčných molekulách vázány silně. U relaxačních polarizací je velmi důležitá teplota, přesněji tepelný pohyb nosičů náboje. Slabě vázané částice překonávají díky svému tepelnému pohybu potenciálové bariéry mezi jednotlivými možnými polohami. Bez přítomnosti elektrického pole k polarizaci nedochází. Bez přiloženého elektrického pole je tepelný pohyb nosičů chaotický, všechny možné polohy nosičů jsou stejně pravděpodobné a tím nedochází k jejich nerovnoměrnému rozložení, k polarizaci tedy nedochází. Přiložené elektrické pole změní výšky potenciálových bariér do té míry, že určité polohy nosičů náboje se stanou energeticky výhodnějšími a tedy i pravděpodobnějšími. Tím se změní rozložení nosičů náboje v jednotce, vznikne asymetrie a jednotka objemu dielektrika získá dipólový moment (dojde k relaxační polarizaci). Přechod od nepolarizovaného dielektrika k dielektriku zpolarizovanému nenastane okamžitě po přiložení elektrického pole, ale celý proces polarizace je časově proměnným jevem silně

závisejícím na vnějších podmínkách. K ustálenému stavu polarizace se látka (její nosiče elektrického náboje) blíží asymptoticky. Velmi důležitou charakteristikou polarizace je časová konstanta  $\tau$  (s) vyjadřující relaxační dobu. Nosiče elektrického náboje potřebují k zaujmutí nových, energeticky výhodnějších poloh určitý čas. Po ukončení působení elektrického pole se nosiče vrací do svých výchozích poloh vlivem svého tepelného pohybu. Zánik polarizace je proto také přechodným jevem. Na rozdíl od pružných polarizací jsou relaxační polarizace vždy provázeny ztrátami energie v dielektriku, které se tím ohřívá. Mezi relaxační polarizace patří dipólová, iontová-relaxační, mezivrstevná (migrační), samovolná a trvalá polarizace [1] [2].

Závislost  $P = F(t)$  po připojení elektrického pole [2]:

$$P = P_n \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.8)$$

Závislost  $P = F(t)$  po odpojení elektrického pole [2]:

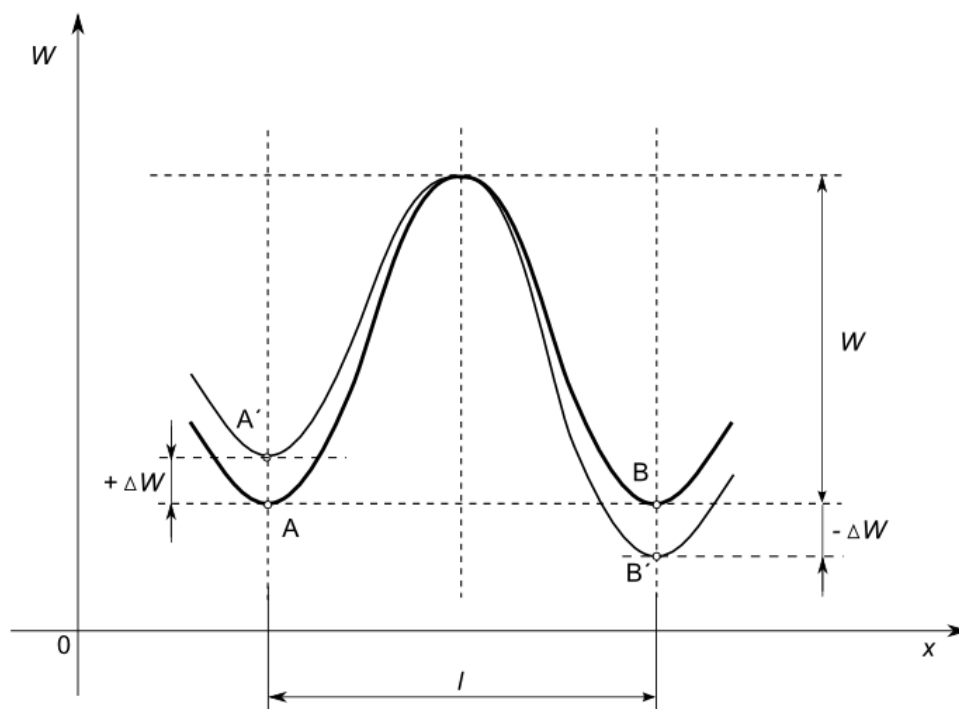
$$P = P_n \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.9)$$

kde  $P_n$  je polarizace nasycení  
 $\tau$  je časová konstanta polarizace

Relaxační doba je definována jako doba, za niž poklesne úroveň polarizace v látce na  $1/e$  násobek původní hodnoty  $P_n$  po odstranění elektrického pole [1].

### 2.3.3 Popis mechanismu relaxační polarizace

Pro popis mechanismu těchto polarizací lze použít tzv. model dvojité potenciálové jámy. Nosiče elektrického náboje obou polarit mohou zaujímat dvě různé energeticky rovnocenné polohy, mezi kterými kmitají svým tepelným pohybem. Tyto energetické poměry je možné sledovat na obrázku 2. Když na látku nepůsobí elektrické pole, leží obě možné polohy A i B na stejné energetické úrovni (na obrázku znázorněno tlustou čarou). Díky svému tepelnému pohybu překonávají nosiče elektrického náboje potenciálovou bariéru (má velikost  $W$ ), ale pouze v případě, kdy je kinetická energie tepelného pohybu nosiče náboje alespoň stejně velká jako výška bariéry  $W$ .



**Obr.2:** Princip dvojité potenciálové jámy

Přechod z polohy A do polohy B a v opačném směru z B do A jsou stejně pravděpodobné, protože částice v obou směrech překonávají stejnou energetickou bariéru. Pravděpodobnost přechodu je dána Boltzmannovým rozdělením [2]:

$$P(A \rightarrow B) \approx P(B \rightarrow A) \approx e^{-\frac{W}{kT}} \quad (2.10)$$

kde  $W$  je velikost potenciálové bariéry (charakteristická pro danou látku za daných podmínek) ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

$k$  je Boltzmanova konstanta,  $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$

$T$  je termodynamická teplota (K)

Ze vzorce 2.10 je patrné, že pravděpodobnost přechodu z jedné polohy do druhé roste se vzrůstající teplotou (při které roste také kinetická energie) a klesá s rostoucí hladinou  $W$  (zvyšuje se velikost bariéry).

Bez přítomnosti vnějšího elektrického pole jsou počty přecházejících částic v obou směrech stejné, rozložení nosičů nábojů obou polarit v objemu látky bude zcela náhodné (s největší pravděpodobností rovnoměrné), z elektrického hlediska se látka chová zcela neutrálně, nedochází k polarizaci.

Pokud začne na látku působit vnější elektrické pole, dojde k posunutí energetických úrovní jednotlivých poloh (viz obrázek), tyto nové polohy jsou označeny jako A' a B' (nový průběh energie je na obrázku zakreslen slabě). Působením elektrického pole se nemění hodnota W, ale dochází ke změně hloubky jednotlivých potenciálových jam. Energetická „hloubka“ polohy A se zmenšila o hodnotu -ΔW a energetická „hloubka“ polohy B se naopak zvětšila o hodnotu ΔW. Po této změně má částice v poloze A' před sebou nižší bariéru než před přiložením elektrického pole a částice v poloze B' má před sebou naopak bariéru vyšší. To znamená, že pravděpodobnost přechodu nosiče náboje z polohy A' do polohy B' bude větší než pravděpodobnost přechodu z polohy B' do polohy A'. Pravděpodobnosti přechodů mezi stavy A' a B' lze určit ze vztahů [2]:

$$P(A' \rightarrow B') = e^{-\frac{W-\Delta W}{kT}} \quad (2.11)$$

$$P(B' \rightarrow A') = e^{-\frac{W+\Delta W}{kT}} \quad (2.12)$$

Ze vztahů je patrné, že pravděpodobnost  $P(A' \rightarrow B')$  je větší než  $P(B' \rightarrow A')$ . Z toho vyplývá že bude pravděpodobný počet nosičů náboje v poloze A' menší než v poloze B' [2].

## **2.4 Permittivita a ztrátový činitel dielektrických a izolačních materiálů**

Permittivita je veličina, která popisuje v případě statického pole izolační vlastnosti dielektrika a v případě střídavého pole vztah mezi vektory elektrického pole a elektrické indukce.

### **2.4.1 Permittivita ve statickém elektrickém poli**

Celková permittivita dielektrika je dána součinem permittivity vakua ( $\epsilon_0$ ) a relativní permittivity ( $\epsilon_r$ ). Tato permittivita nahrazuje permittivitu vakua ve všech elektrostatických rovnicích, jestliže prostor je místo vakua vyplněn dielektrikem. Celková permittivita se označuje  $\epsilon$  a lze ji vypočítat podle vzorce:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (2.13)$$

$\varepsilon_0$  je permitivita vakua. Je to fyzikální konstanta, která se vyskytuje v Coulombově zákoně pro elektrickou sílu mezi dvěma elektricky nabitými tělesy ve vakuu. Permitivitu vakua má velikost  $\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ .

$\varepsilon_r$  je relativní permitivita. Je to látková konstanta a vyjadřuje, kolikrát se zvětší kapacita kondenzátoru, umístí-li se mezi elektrody dielektrikum.

### 2.4.2 Permitivita ve střídavém elektrickém poli

Dielektrikum, na které působí střídavé pole, se chová zcela jinak, než při působení stejnosměrného pole. Popis dějů vznikajících působením střídavého pole je značně náročnější, protože je nutné brát v úvahu kinetické vlastnosti částic. Příčinou fázového zpoždění vektoru elektrické indukce  $\mathbf{D}(t)$  za vektorem intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}(t)$  o úhel  $\delta$  (při předpokladu přiložení napětí sinusového průběhu) je právě setrvačnost těchto částic [2].

Pro vyjádření vztahu vektoru elektrické indukce  $\mathbf{D}(t)$  a vektoru intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}(t)$  se využívá symbolicko-komplexní metoda [2]:

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{D}_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_m \cdot e^{j\omega t} \quad (2.15)$$

kde  $\mathbf{D}_m$  a  $\mathbf{E}_m$  jsou amplitudy vektorů.

Vztah mezi vektorem elektrické indukce  $\mathbf{D}(t)$  a vektorem intenzity elektrického pole je vyjádřen rovnicí [2]:

$$\mathbf{D}_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot \mathbf{E}_m \cdot e^{j\omega t} \quad (2.16)$$

Po vykrácení členů, které obsahují čas, je možné psát rovnici [2]:

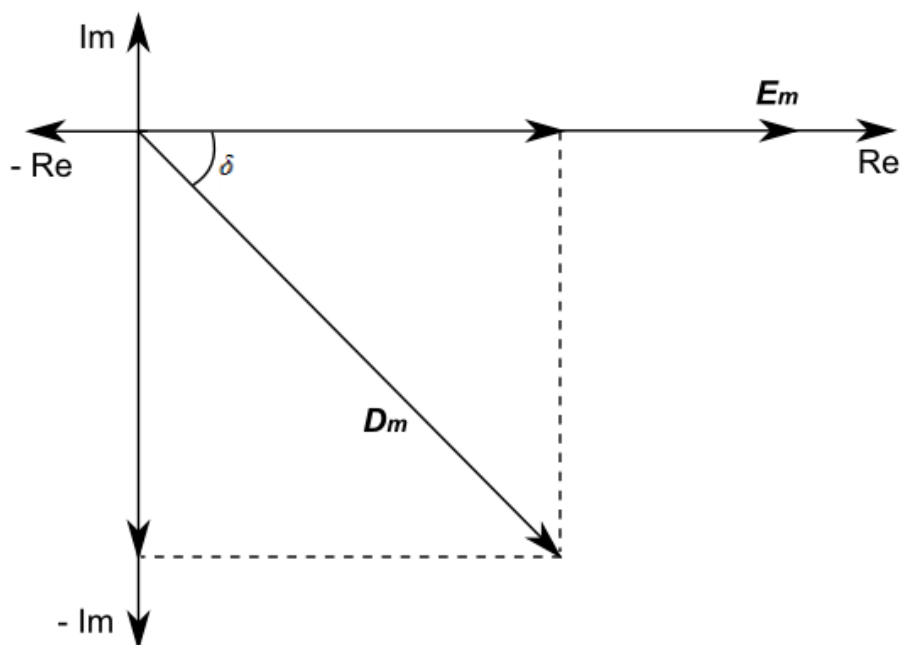
$$\mathbf{D}_m \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot \mathbf{E}_m \quad (2.17)$$

Poslední vztah se podobá známému vztahu mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole při namáhání statickým elektrickým polem. Rodily jsou ve fázovém posunutí obou vektorů o jistý úhel  $\delta$  a také o vyjádření permitivity. V tomto případě se zavádí frekvenčně závislá komplexní permitivita  $\varepsilon^*(j\omega)$ , pro kterou platí [2]:

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (2.18)$$

kde  $\varepsilon'(\omega)$  a  $\varepsilon''(\omega)$  jsou reálná a imaginární část komplexní permitivity (obě části jsou frekvenčně závislé).

Reálná složka komplexní permitivity je vlastní relativní permitivita (udává míru kapacitního charakteru dielektrika). Ve střídavém poli má reálná část komplexní permitivity  $\varepsilon'(\omega)$  stejný význam jako  $\varepsilon_r$  v poli statickém. Imaginární část komplexní permitivity  $\varepsilon''(\omega)$ , často nazývaná také jako ztrátové číslo, je mírou ztrát vzniklých v materiálu, který je namáhaný střídavým elektrickým polem. Představu o komplexní permitivitě a vektorech elektrické indukce a intenzity elektrického pole ukazuje obrázek 3 [2].



**Obr.3:** Grafická interpretace komplexní permitivity

### 2.4.3 Ztrátový činitel

Podle obrázku je možné určit velikost fázového zpoždění vektoru elektrické indukce za vektorem intenzity elektrického pole [2]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon''(\omega) \cdot E_m}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega) \cdot E_m} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2.19)$$

Ztráty vzniklé v dielektriku při jeho namáhání střídavým polem charakterizuje imaginární část komplexní permitivity  $\varepsilon''(\omega)$  a také poměr imaginární a reálné části komplexní permitivity  $\tan \delta$ , který se proto nazývá ztrátový činitel. Pokud se ztrátový úhel rovná nule, je dielektrikum bezeztrátové (ideální), jeho permitivita neobsahuje imaginární složku. Ztrátové dielektrikum lze pro účely výpočtu ztrátového výkonu  $P_z$  nebo  $\tan \delta$  nahradit ekvivalentním zapojením bezeztrátových prvků, které charakterizují jeho ztráty. Na volbě náhrady teoreticky nezáleží, pouze musí být činný výkon a fázový úhel ztrátové soustavy ekvivalentní ztrátovému výkonu a fázovému úhlu ztrátového dielektrika [2].

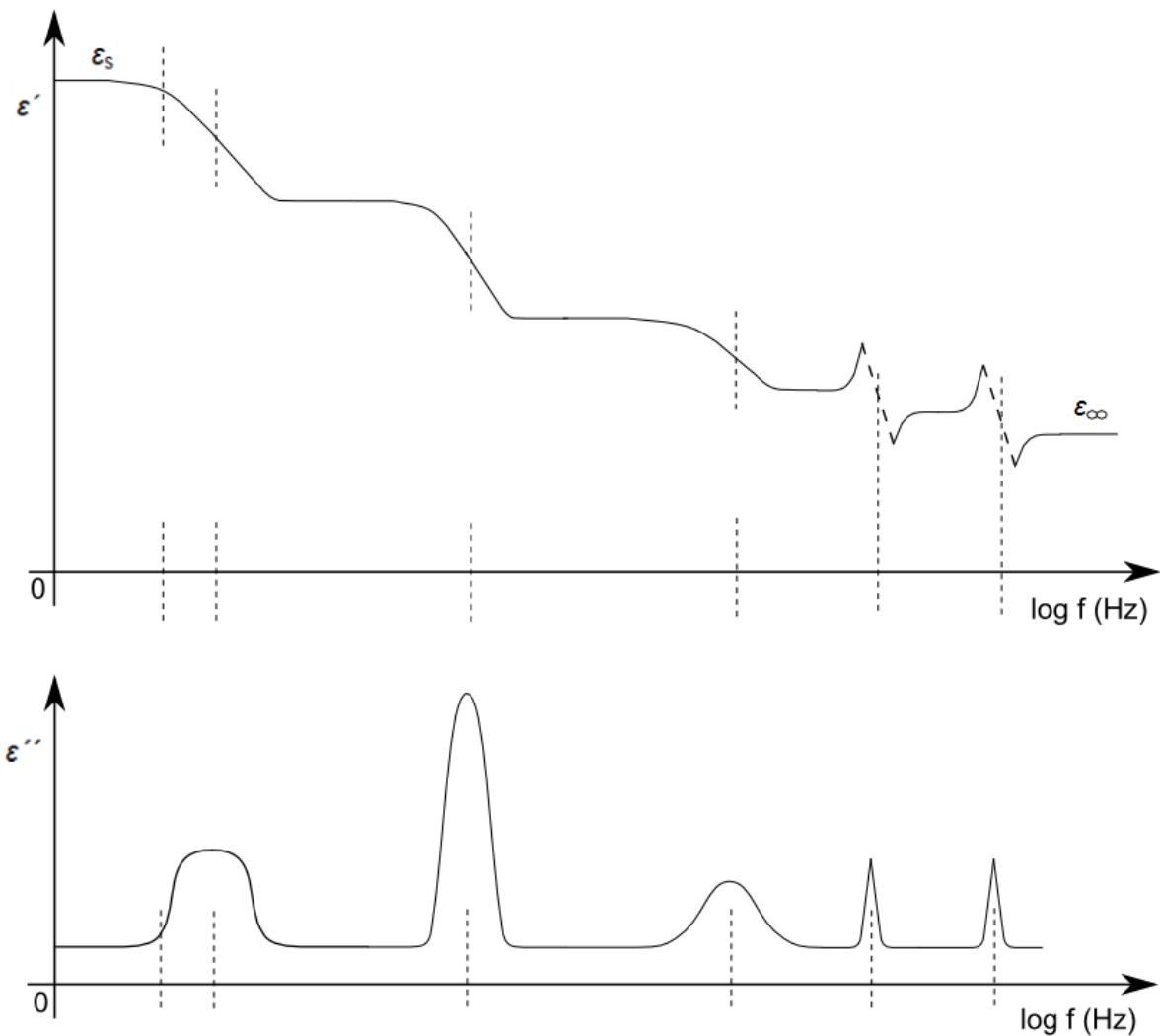
**Velikost ztrátového činitele může ovlivnit [2] [1]:**

- teplota
- kmitočet elektrického pole
- intenzita elektrického pole (u feroelektrik a v případě ionizačních ztrát)

#### **2.4.4 Příspěvky jednotlivých druhů polarizací k permitivitě dielektrik**

Ze změnou frekvence elektrického pole nepřispívají jednotlivé druhy polarizací k permitivitě stejnou měrou. V technickém dielektriku (v němž se vyskytují základní druhy polarizací) je závislost permitivity na kmitočtu při konstantní teplotě dána složením křivek odpovídajících jednotlivým polarizačním mechanismům. Průběh této závislosti pro obě složky komplexní permitivity je zobrazen na obrázku 4. Z průběhu závislosti reálné složky komplexní permitivity na frekvenci je vidět, že při nejnižších kmitočtech přispívají k permitivitě všechny uvažované druhy polarizací, to znamená, že permitivita má největší hodnotu  $\varepsilon_s$ . S rostoucí frekvencí postupně ustávají jednotlivé druhy polarizací tak, jak klesá schopnost částic sledovat změny elektrického pole, dochází tedy k poklesu reálné složky permitivity. V oblasti optických frekvencí probíhají už jen polarizace optické, kterým odpovídá  $\varepsilon_\infty$ . Závislost imaginární složky na frekvenci prochází různě velkými maximy podle toho, jak který relaxační mechanismus přispívá ke ztrátám v dielektriku. Velmi významný je také vliv teploty. Se zvyšující se teplotou se disperzní oblasti (oblasti poklesu průběhu reálné části komplexní relativní permitivity) posouvají k vyšším frekvencím, protože dipólové molekuly se stávají pohyblivějšími. Struktura a chemické složení látky určuje polohu, počet a průběhy disperzních oblastí. Příklad závislosti obou složek komplexní permitivity na frekvenci je vidět na obrázku 4 [2].





Obr. 4: Příklad průběhu složek  $\epsilon'$  a  $\epsilon''$  komplexní permitivity dielektrika

## 2.5 Ztráty v dielektriku

Pro použití určitého druhu materiálu je rozhodující, kolik elektrické energie se díky dějům odehrávajícím se v jeho struktuře po zatížení elektrickým polem změní v jeho objemu za jednotku času v jinou energii (z hlediska dielektrik v nežádoucí tepelnou energii). Tato změna energie představuje dielektrické ztráty, jejichž vlivem se dielektrikum zahřívá. Při provozu daného zařízení je nutné zajistit, aby se vznikající teplo odvádělo do okolí a nedocházelo k přehřívání dielektrika. Přehřátí okamžitě vede k dalšímu nárůstu ztrát a tím k opětovnému zvýšení teploty dielektrika. Tento nežádoucí, stále se opakující proces může po určité době končit tepelným průrazem a destrukcí materiálu, popřípadě celého elektrického zařízení.

Vznik dielektrických ztrát v jednotlivých materiálech záleží na mnoha faktorech, především na druhu materiálu, jeho struktuře a vlastnostech, chemickém složení, obsahu nečistot a příměsí, na vnitřní stavbě a skupenství a na vnějších fyzikálních podmínkách působících na daný materiál. Dielektrické ztráty vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí (při jakémkoli tvaru napěťové křivky) [2].

**Velikost dielektrických ztrát lze vyjádřit pomocí [2] [1]:**

- ztrátového úhlu  $\delta$
- ztrátového činitele  $\operatorname{tg} \delta$
- ztrátového čísla (imaginární složka komplexní permitivity)  $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta$
- měrných dielektrických ztrát (ztrátový výkon  $P$  vztahovaný na jednotkový objem látky).

**Podle fyzikální podstaty je možné rozlišit ztráty na [2] [1]:**

- vodivostní ztráty
- polarizační ztráty
- ionizační ztráty

Celkové ztráty dielektrik jsou potom dány součtem ztrát, které se v dielektriku vyskytují, a které působí souhlasně na dielektrikum.

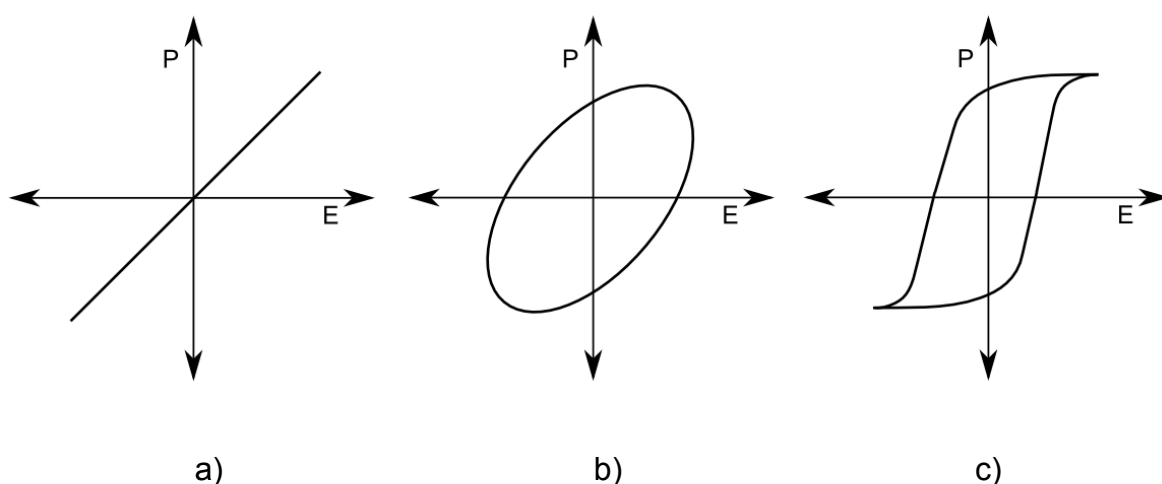
**Vodivostní ztráty** se vyskytují u všech druhů dielektrik, závisí na vnitřní a povrchové vodivosti dielektrika. Vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí vlivem vodivostního proudu procházejícího dielektrikem. Důsledkem je degradace energie elektrického pole, která se mění v Jouleovo teplo. Tyto ztráty vznikají při srážkách volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky [1] [2].

**Ionizační ztráty** vznikají vlivem částečných výbojů v nehomogenitách dielektrika. Tyto částečné výboje přemostňují pouze určitou část vzdálenosti mezi elektrodami a mají degradační účinky na prostředí, ve kterém vznikají. Ionizační ztráty vznikají pouze při překročení prahu ionizace [1] [2].

**Polarizační ztráty** jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku a mají významný podíl na celkové výši ztrát. Velikost těchto ztrát a jejich teplotní a kmitočtové závislosti závisejí na druhu polarizace. U elektronové a iontové pružné polarizace polarizační ztráty prakticky neexistují. Naopak dipólová a iontová

relaxační polarizace se vyznačuje velkými ztrátami, které jsou značně závislé na teplotě a na kmitočtu. Tyto ztráty vznikají tak, že vnější elektrické pole částečně překonává a usměřňuje chaotický tepelný pohyb částic, čímž jej narušuje. Pohyby vázaných nosičů elektrického náboje se zpožďují za změnami vnějšího elektrického pole a část energie získané na úkor elektrického pole se při těchto dějích mění na teplo. Velikost polarizačních ztrát závisí na teplotě dielektrika a také na frekvenci působícího elektrického pole. K polarizačním ztrátám patří ještě rezonanční ztráty, které se v dielektriku vyskytují při kmitočtech odpovídajících kmitočtu světelného spektra a jsou charakteristické silnou selektivitou při určitém kmitočtu [1] [2].

Na obrázku 5 je závislost velikosti vektoru polarizace na intenzitě působícího střídavého elektrického pole v průběhu jedné periody.



**Obr. 5:** Závislost vektoru polarizace na intenzitě elektrického pole

Pokud se v materiálu vyskytují pouze pružné polarizace (elektronová nebo iontová), závislost  $P = f(E)$  je lineární (obr. 5a), polarizační ztráty nevznikají. Pokud má závislost  $P = f(E)$  tvar elipsy, dochází v dielektriku i k polarizačním relaxačním, obsah elipsy je úměrný velikosti ztracené energie přeměněné v teplo za jednu periodu (obr. 5b). Obrázek 5c platí pro feroelektrické látky (látky spontánně polarizované), závislost  $P = f(E)$  má tvar hysterezní smyčky, plocha ohraničená smyčkou je opět úměrná velikosti ztracené energie [2].

### 2.5.1 Dielektrické ztráty nehomogenních materiálů

V praxi se používají materiály, které jsou více či méně nehomogenní. Nehomogenity vznikají ve výrobě a zpracování daného materiálu, ale také vlivem provozního namáhání. Vrstvené a kompozitní materiály jsou nehomogenní již svojí podstatou. Na nehomogenitách se mohou vytvářet prostorové náboje (náboje vznikající při migrační polarizaci), což je spojeno se ztrátou energie. Pokud jsou nehomogenity ve formě bublinek, které jsou vyplněné plynem, dochází od určité úrovně elektrického namáhání k zapálení částečných výbojů a ke vzniku ionizačních ztrát. O velikosti vznikajících dielektrických ztrát v daném materiálu tedy rozhoduje nejen správná volba materiálu, ale také správný a dodržovaný technologický postup jeho výroby. Nehomogenity tedy mohou u těchto materiálů výrazně zvýšit dielektrické ztráty. Dielektrické ztráty velmi často ovlivňují volbu materiálu pro určitý účel [2].

## 2.6 Činitelé klimatu

Činitelé klimatu (například teplota, vlhkost, tlak, záření) mají zásadní vliv na vlastnosti dielektrických materiálů a tím i na provoz elektrických zařízení. V další části je uveden popis dvou hlavních činitelů klimatu – teploty a vlhkosti vzduchu.

### 2.6.1 Teplota

Vliv teploty se může při působení na elektrotechnické materiály a zařízení projevit[4]:

- vysokou teplotu
- nízkou teplotu
- rychlými změnami teplot sledovaného objektu

**Vysoká teplota** mění elektrické a také jiné vlastnosti materiálů (např. mechanické vlastnosti), dále urychluje stárnutí organických materiálů, hlavně izolantů tepelně namáhaných. Při vysoké teplotě termoplasty měknou, popřípadě se náhle taví [4].

**Nízká teplota**, stejně jako vysoká teplota, mění elektrické a mechanické vlastnosti materiálů (klesá pružnost látek, které tím tvrdnou, zvyšuje se pevnost v tahu, klesá ale tažnost a tím u některých látek i odolnost proti rázovému namáhání), hlavně látek makromolekulární povahy. Při snížení teploty vzrůstá vnitřní rezistivita izolantů (i u navlhých), elektrická pevnost se většinou výrazně nemění. Teplotní kontrakce způsobuje změny objemu, vlivem vysoušení materiálů může dojít k popraskání, popřípadě k uvolnění spojení (například dvou plastů, nebo plastu s kovem) [4].

**Rychlé změny teploty** prudce mění elektrické a mechanické vlastnosti materiálů, především izolantů. Pokud nejsou elektrické součástky, popřípadě části elektrických zařízení vhodně konstruovány, mohou se výrazně změnit jejich elektrické parametry. Může docházet k mechanickým pnutím, které jsou způsobené tepelnou expanzí a kontrakcí při rychlé změně teploty [4].

## 2.6.2 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu má rozhodující vliv na navlhávání látek. Vlhkost, která působí na dielektrické materiály a elektrická zařízení, je možné rozdělit na [4]:

- vysokou vlhkost
- nízkou vlhkost
- rychlé změny vlhkosti

Vlhkost vzduchu představuje množství vodních par ve vzduchu. Vlhkost vzduchu se dá vyjádřit pomocí [4]:

- absolutní vlhkosti vzduchu
- relativní vlhkosti vzduchu

### Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu, nejčastěji označovaná jako  $\phi$ , je definována hmotností vodní páry, která je obsažena v jednotce jeho objemu. Hodnota absolutní vlhkosti se většinou udává v  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a její velikost je velmi silně závislá na teplotě. Vzduch může obsahovat při dané teplotě pouze maximální hodnotu absolutní vlhkosti  $\phi_{max}$ , je možné říct, že při této vlhkosti je vzduch vodními parami nasycen. Větší množství vodní páry nemůže již vzduch obsahovat, protože by se srážela ve formě rosy. Maximální hodnota  $\phi_{max}$  se s rostoucí teplotou zvyšuje. To znamená, že teplejší vzduch může obsahovat větší množství vodní páry než vzduch chladnější [4].

### Relativní vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu je nejčastěji označovaná jako  $\varphi$ . Definuje se pomocí poměru absolutní vlhkosti vzduchu k absolutní vlhkosti vzduchu nasyceného vodními

parami, udává se v procentech. Relativní vlhkost vzduchu se obvykle pohybuje v rozmezí od 45 do 75 %. Platí [4]:

$$\varphi = \frac{\phi}{\phi_{\max}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.20)$$

V této práci jsou vlhkosti vzduchu vyjadřovány výhradně pomocí relativní vlhkosti.

**Vysoká vlhkost vzduchu** způsobuje navlhání materiálů a tím podstatně zhoršuje jejich elektrické, mechanické a chemické vlastnosti. Mechanické vlastnosti se často mění v důsledku bobtnání, které se vlivem vyšších teplot ještě urychluje. Destrukce (trhliny, puchýřky) způsobené vlivem vlhkosti bývají spojeny se změnou rozměrů a tvarů součástí, materiálů a dílů elektrických zařízení. Z elektrických vlastností se u dielektrik snižuje povrchová rezistivita vlivem adsorpce vody na povrchu látek, snižuje se také vnitřní rezistivita vlivem urychlené difuze vodních par, vzrůstá ztrátový činitel a klesá elektrická pevnost. Chemické změny se mohou uplatnit i se znečištěním ovzduší a projevují se urychlenou korozí kovů a izolantů (např. plastů nebo laků) [4].

**Nízká vlhkost vzduchu** může způsobit změnu mechanických vlastností některých materiálů vlivem vysychání, které je často provázeno objemovými změnami a deformací tvarů [4].

**Rychlé změny vlhkosti vzduchu** vznikají často při změnách teploty a podstatně zhoršují elektrické, mechanické a chemické vlastnosti většiny materiálů, především izolantů. Urychluje se koroze, která se projevuje u kovů i u izolantů. Zhoršují se především povrchové vlastnosti látek, v uzavřených dutinách výrobků nebo v pórech izolačních systémů může docházet k hromadění vody [4].

### 2.6.3 Současné působení klimatických činitelů

Elektrotechnické materiály a elektrická zařízení jsou v různých klimatických oblastech ovlivňovány velkým množstvím klimatických činitelů, které většinou nepůsobí samostatně, ale v různých kombinacích současně. Působení klimatických činitelů se vyznačuje proměnlivou intenzitou a někdy je i přerušováno kratšími nebo delšími časovými obdobími. Účinky současně působících činitelů se většinou zesilují, v méně častých případech se neovlivňují nebo dochází dokonce k zeslabení těchto účinků. Proto bývají změny vyvolané současným působením několika činitelů

rozdílné od změn vyvolaných součtem izolovaných působení jednotlivých klimatických činitelů.

Pokud dojde k současnému působení velké vlhkosti a vysoké teploty vzduchu, tlak vodních par se zvýší a následně dochází ke zrychlené difuzi vodních par do materiálu. Přítomnost vody v materiálu způsobí značné změny jeho vlastností a tím může dojít i ke vzniku poruchy na celém elektrickém zařízení [4].

#### **2.6.4 Navlhavost látek**

Navlhavost, nebo také hygroskopičnost, je schopnost látek přijímat vlhkost z okolního ovzduší. Navlhávání je dlouhodobý proces, při kterém se v látce, uložené v prostředí o dané stálé relativní vlhkosti (např. v exsikátoru) a stálé teplotě, zvyšuje postupně počáteční malý obsah vlhkosti v jednotkovém objemu látky a asymptoticky se blíží k rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá relativní vlhkosti prostředí, ve kterém je uložena. Dlouhodobý je také proces vysoušení navlhklých látek. V tomto případě se naopak počáteční velký obsah vlhkosti v jednotkovém objemu látky postupně snižuje a asymptoticky blíží k rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá dané relativní vlhkosti prostředí [4].

Úroveň rovnovážné vlhkosti látky ovlivňují [4]:

- struktura látky,
- relativní vlhkost prostředí, ve kterém je látka uložena,
- teplota.

Základní fyzikální jev při navlhavosti představuje adsorpce molekul vody, tento proces probíhá na povrchu tuhé látky.

Adsorpce molekul vody je důsledkem působení adsorpčních sil mezi sorbentem (látka, která přijímá vodní páru) a sorbendem (sorbovaná látka) [4].

Při adsorpci se mohou uplatňovat tyto síly [4]:

- elektrostatické (podstatné jsou především mezi vodou, která je nositelem stálého dipólového momentu a sorbentem, pokud má rovněž dipólový charakter (hydrofilní látky)) ,
- van der Waalsovy síly (uplatňují se ve všech případech adsorpce),
- chemické síly (uplatňují se při tzv. chemisorpci).

## 2.7 Teorie složené soustavy

Teorie složené soustavy lze využít, pokud je třeba znát nejen materiálové vlastnosti soustavy, ale i vztah těchto vlastností k příslušným vlastnostem složek. Hlavním úkolem této teorie je vyhledání vhodného směsného vztahu. Výslednou vlastnost  $X_s$  mnohosložkové soustavy, která je složená 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 možné určit obecně funkcí [1]:

$$X_s = F(X_1, X_2, \dots, X_n, v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (2.21)$$

přičemž musí platit [1]:

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (2.22)$$

Funkční závislost 2.21 je v konkrétních případech většinou velmi složitá (zahrnuje i vliv tzv. geometrie složené soustavy). Geometrie složené soustavy je určena rozložením částic v soustavě, tvarem částic, orientací částic vzhledem k působícímu silovému poli, příp. i velikostí částic. Výjimkou jsou případy jednoduchých složených soustav (tvořených paralelně nebo sériově řazenými vrstvami několika různých materiálů).

Z hlediska teoretického řešení složených soustav není rozhodující, jestli se sledují vlastnosti elektrické, magnetické nebo tepelné, protože chování materiálů v elektrických, magnetických a tepelných polích je popsáno formálně stejnými diferenciálními rovnicemi a je charakterizováno stejnými okrajovými podmínkami. Proto je možné směsné vztahy, odvozené např. pro permitivitu, použít i pro sledování permeability popřípadě vnitřní konduktivity. Vztah odpovídajících si veličin v jednotlivých polích je vidět v tabulce 2.



**Tab. 2:** Veličiny v elektrických, magnetických, tepelných a difúzních polích

<b>Elektrostatické pole</b>	<b>Elektrodynamické pole</b>	<b>Magnetostatické pole</b>	<b>Tepelné pole</b>	<b>Difúzní pole</b>
Intenzita elektrického pole	Napětí	Intenzita magnetického pole	Teplotní spád	Spád parciálního tlaku
Elektrická indukce	proudová hustota	Magnetická indukce	Tepelný tok	Difúzní tok
permitivita	Vnitřní konduktivita	permeabilita	Měrná tepelná vodivost	Součinitel difúze

Teoretický přístup k řešení složených soustav vychází z teorie potenciálů v silových polích s přihlédnutím k okrajovým podmínkám, pro daný případ je pak základním úkolem nalezení příslušné řešení Laplaceovy rovnice. Řešení vychází ze zjištění potenciálu v libovolném bodě uvnitř i vně jedné makroskopické částice uložené do vnějšího silového pole. Zadané úlohy lze však řešit pouze v případě částic, které mají tvar, jenž lze řešit v silovém poli (např. koule nebo elipsoid), a to pouze při nízké koncentraci částic v soustavách matričního typu. V případě většího počtu částic v soustavě nastávají v řešení úlohy vážné matematické obtíže a to i za předpokladu, že částice jsou popsány jednoduchými geometrickými tvary. Na každou jednotlivou částici působí totiž kromě vnějšího silového pole také silová pole vytvářená ostatními vloženými částicemi a stejně tak působí i sledovaná částice svým polem na částice ostatní. Potenciály v jednotlivých bodech soustavy nelze z důvodů vzájemného ovlivňování částic vyčíslit. Výjimku tvoří případy, když jsou částice v soustavě rozloženy pravidelně, nebo pokud je koncentrace částic velmi nízká [1].

### 2.7.1 Permittivita složené soustavy

Nejčastějším případem řešených složených soustav jsou soustavy dvousložkové. Pro permitivitu těchto soustav byla v minulosti odvozena celá řada směsných vztahů. Zkoumání jejich tvaru však ukazuje, že velká část vztahů se od jistého obecného vztahu liší pouze v použité aproximaci.

Pokud je permitivita matričního prostředí označena jako  $\varepsilon_2'$  a permitivita částic kulového tvaru  $\varepsilon_1'$ , potom při odvození zevšeobecněného vztahu se uvažuje, že každá částice je obklopena prostředím o efektivní permitivitě  $\varepsilon_{ef}'(\varepsilon_2'; \varepsilon_s')$ .

Jestliže se pracuje se středními prostorovými hodnotami elektrické indukce a intenzity elektrického pole, je možné pro sledovaný případ částic kulového tvaru vyjádřit permitivitu soustavy  $\varepsilon_s'$  výrazem [1]:

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_2' \left[ 1 + v_1 \left( \frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_2'} - 1 \right) \frac{3\varepsilon_{ef}'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_{ef}'} \right] \quad (2.23)$$

Výraz 2.23 lze považovat za zevšeobecněný směsný tvar, který je možné převést do tvaru [1]:

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_2'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_{ef}'}{\varepsilon_2'} \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_{ef}'} \quad (2.24)$$

V Maxwellově přístupu je použita aproximace  $\varepsilon_{ef}' = \varepsilon_2'$ , potom směsný vztah pro případ matriční soustavy s nízkou koncentrací částic tvaru stejných koulí je možné napsat ve tvaru [1]:

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_2'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'} \quad (2.25)$$

Z aproximace  $\varepsilon_{ef}' = \varepsilon_s'$  vychází Böttcherův směsný vztah, který má pro soustavy s kulovými částicemi tvar [1]:

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_s'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_s'} \quad (2.26)$$

V technické praxi jsou často používány Lichteneckerovy směsné vztahy [1]:

$$\varepsilon_s'^k = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i'^k \quad (2.27)$$

Pro případ dvousložkové soustavy je rovnice ve tvaru [1]:

$$\varepsilon_s'^k = v_1 \varepsilon_1'^k + v_2 \varepsilon_2'^k \quad (2.28)$$

Vztah obsahuje parametr  $k$ , který je závislý na tvaru a orientaci částic složené soustavy, a který může obecně nabývat jakékoliv hodnoty v rozmezí  $\langle -1; 1 \rangle$ . Pro krajní hodnoty  $k$  odpovídá rovnice (8.8) vztahům [1]:

$$\varepsilon_s' = v_1 \varepsilon_1' + v_2 \varepsilon_2' \quad \text{a} \quad (2.29)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_s'} = v_1 \frac{1}{\varepsilon_1'} + v_2 \frac{1}{\varepsilon_2'} \quad (2.30)$$

Rovnice přechází pro hodnotu  $k \rightarrow 0$  v tzv. Lichteneckerův logaritmický vztah [1]:

$$\log \varepsilon_s' = v_1 \log \varepsilon_1' + v_2 \log \varepsilon_2' \quad (2.31)$$

Tento vztah je jednoduchý a dobře popisuje složené soustavy statistického i matričního typu s libovolnou hodnotou poměrného objemového dílu všech složek soustavy s částicemi libovolného tvaru při chaotickém uspořádání složek. Popis dvousložkové složené soustavy vztahem 2.31 bude nejpřesnější, když bude poměr permitivit obou složek co nejmenší (Lichtenecker uvažoval při odvozování vztahů dvě složky o nejvyšším poměru  $\varepsilon_1' / \varepsilon_2' = 4$ ) [1].

## 3 Experimentální část

### 3.1 Materiály použité při výrobě vzorků

**Polyamidy (PA)** patří mezi termoplasty, tedy látky převážně vznikající polymerací. Polymerace je chemická reakce, při které z malých molekul (monomerů) vznikají vysokomolekulární látky (polymery). Termoplasty měknou při zvýšených teplotách, při ochlazení opět tuhnou. Tyto procesy jsou reversibilní. V důsledku zvyšování teploty se snižuje působení sekundárních mezimolekulárních sil a následkem vzájemného působení externích sil dochází k pohybu makromolekul. Zvyšovat teplotu je možné až do teploty tavení a taveninu je pak možné upravit při technologickém procesu do požadovaného tvaru pomocí forem. Při teplotě tavení nesmí však docházet k poruchám primárních kovalentních vazeb (vazby, které lze charakterizovat sdílením jednoho nebo více párů elektronů mezi dvěma prvky) [3] [1].

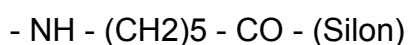
Polyamidy vytvářejí převážně lineární makromolekuly, obsahující v řetězci skupiny - NH - CO -.

Vznikají polykondenzací (reakce, při které vzniká makromolekulární látka reakcí molekuly jedné, nebo několika různých nízkomolekulárních látek) diaminů (odvozených od amoniaku) a dikarbonových kyselin (kyselina adipová), nebo polymerací (reakce při níž výsledný produkt vzniká spojováním molekul) kaprolaktamu v řetězové makromolekuly [1].

Při polykondenzaci vzniká makromolekula typu:



Při polymeraci pak typu:



Polyamidy na rozdíl od typických termoplastů při zvýšených teplotách neměknou, ale náhle se roztaví na řídkou látku (150 až 250 °C podle molekulové hmotnosti). Tato vlastnost umožňuje výrobu fólií a vláken. V tenkých vrstvách jsou průsvitné, v tlustších mají nažloutlou barvu, hnědnou v roztaveném stavu za přítomnosti kyslíku. Využívají se především kvůli svým výborným mechanickým vlastnostem, které jsou závislé na obsahu krystalické fáze, a ta je dána způsobem chlazení taveniny. Jsou špatně hořlavé, stálé na světle a v olejích, nejsou stálé vůči kyselinám a louchům. Výhodou představuje odolnost proti hnilobným bakteriím.

Polyamidy nepředstavují typické elektroizolační materiály. Významnou vlastností polyamidů je jejich schopnost orientace. Protahováním (u vláken až na čtyřnásobnou délku) se řetězce polyamidů uspořádají lineárně a tím značně vzrůstá mechanická pevnost [1].

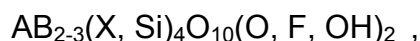
Elektrické vlastnosti:

- relativní permitivita  $\epsilon' = 4 - 25$
- ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-2}$
- vnitřní rezistivita  $\rho_v = 10^8 - 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$
- elektrická pevnost  $E_p = (10 - 50) \cdot 10^6 \text{ V m}^{-1}$

Polyamidy se používají pro ochranné pláště PVC kabelů, elektroizolační polyamidové laky, ochranné kryty, vlákna. Komerční označení polyamidu [1]: Silon, Silamid, Perlon, Igamid, Naylor, Rilsan, Kapron

**Slída** se řadí mezi anorganická přírodní dielektrika, která jsou převážně složená z makromolekulárních sloučenin. Mezi největší přednosti těchto materiálů patří odolnost proti působení vyšších teplot, nehořlavost, velká stabilita (neměnnost charakteristických vlastností v čase). Tyto materiály mají obecně velmi dobré elektrické vlastnosti. Mezi negativní vlastnosti patří malá mechanická pevnost (lámavost, křehkost) [1].

Slída se používá kvůli svým výborným vlastnostem, které jsou dané její strukturou, v níž její stabilitu zajišťují silné kovalentní vazby kyslíku a křemíku O-Si ve vrstvách oxidu křemičitého. Slída je hlavním článkem izolačních materiálů, zejména v oblasti vysokonapěťové izolační techniky. Slída je přírodní materiál, který se vyskytuje v přírodě v mnoha modifikacích, je dobře štípatelná, nehořlavá a chemicky odolná. Její složení charakterizuje obecný sumární vzorec:



v němž jednotlivé symboly představují: A nejčastěji draslík, může být zastoupen sodíkem, baryem, cesiem, amonným iontem, B může být hliník, lithium, železo, zinek, chrom, vanad, mangan, hořčík, X nejčastěji hliník, beryllium, bor, železo. Je známo více než 30 druhů slídových materiálů, ale pro využití v elektrotechnice jsou vhodné následující dva druhy:

1. bezbarvý, světlehnědý až světlezelený muskovit (draselná slída) kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$  s kalcinační teplotou 700 – 800 °C a charakteristickými hodnotami  $\text{tg } \delta = 1 \div 3 \cdot 10^{-4}$ ,  $\epsilon_r = 6 \div 7$ ,  $E_p = 60 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,  $\rho_v = 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ ,
2. tmavý, jantarový, zlatavý až šedý flogopil (hořečná slída) kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý  $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  skalcinační teplotou 900 – 1000 °C a charakteristickými hodnotami  $\text{tg } \delta = 1 \div 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $\epsilon_r = 5 \div 6$ ,  $E_p = 45 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,  $\rho_v = 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ .

Slída má stálé, prakticky neměnné vlastnosti, až do své kalcinační teploty, při této teplotě ztrácí slída ve své struktuře vázanou vodu. Tato ztráta je provázena skokovou změnou vlastností, takže v oblasti vyšších teplot, než je její kalcinační teplota, je slída prakticky nepoužitelná [1].

Slída se prodává jako bloková (až 0,8 mm), kalibrovaná (přísná tolerance velikosti částíček), štípaná a mletá [1].

### **3.2 Experimentální vzorky**

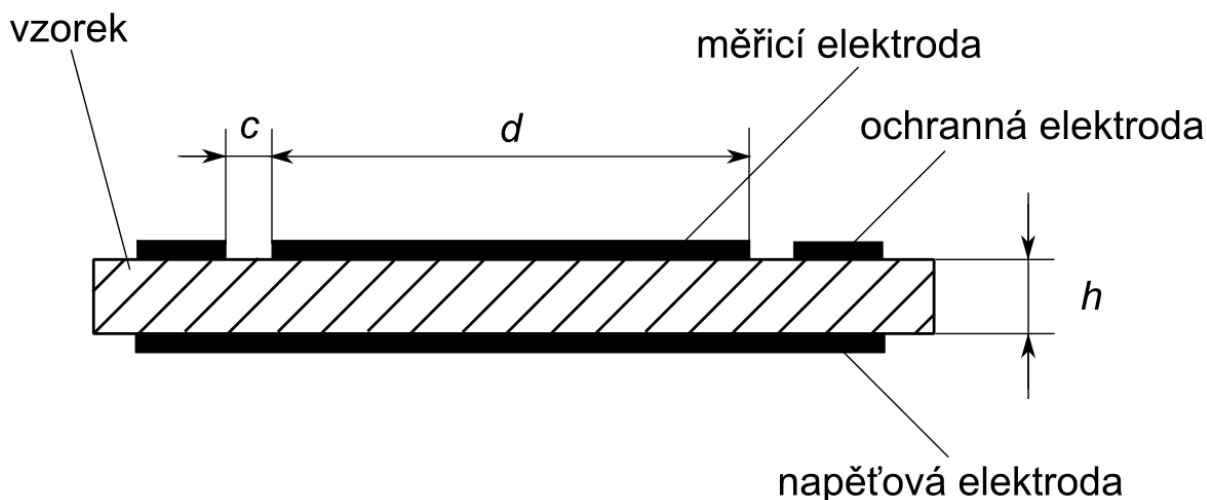
Experimentální vzorky byly vyrobeny v Polymer Institutu Brno s.r.o. Vzorky byly plněny mletou slídou MICA MU85 s různým hmotnostním procentem. Zrna slídy měla velikost 40  $\mu\text{m}$ . Základem pro výrobu vzorků byl granulát polyamidu PA6 a granulát téhož polyamidu s 40% hmotnostním plněním mletou slídou. Vstřikovací technikou byly z těchto granulátů vyrobeny vzorky s plněním 0 %, 10 %, 20 %, 30 % a 40 % o rozměrech 115 mm x 115 mm s tloušťkou 3 mm. Při změně plnění bylo vždy prvních cca 0,5 kg materiálu vyřazeno, aby se zajistilo přesné hmotnostní plnění. Povrch vzorků byl dostatečně rovný a hladký, proto nebylo nutné použít při měření napařených elektrod. Vzorky pro experiment byly vybrány náhodně, protože se předpokládala (podle informací výrobce) dostatečná stejnorodost jednotlivých sad vzorků.

### **3.3 Měření složek komplexní permitivity**

#### **3.3.1 Elektrodotový systém**

Elektrodotový systém je tvořen třemi elektrodami - měřicí, napěťovou a ochrannou. Napěťová a měřicí elektroda je kruhového tvaru, ochranná elektroda má tvar prstence kolem měřicí elektrody. Ochranná elektroda je určena k odstranění chyb, které jsou způsobeny okrajovými jevy. Její šířka má být alespoň dvojnásobkem

tloušťky vzorku a mezera mezi ní a měřicí elektrodou má být v porovnání s tloušťkou vzorku malá. Schematické zobrazení elektrodového systému je znázorněno na obrázku 6 [2].



**Obr.6:** Uspořádání třielektrodového systému

Geometrickou kapacitu (kapacitu vzduchového kondenzátoru stejných rozměrů) lze vypočítat podle vztahu [2]:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h} \quad (\text{F}) \quad (3.1)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua ( $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ )  
 $S_{ef}$  je efektivní plocha měřicí elektrody ( $\text{m}^2$ )  
 $h$  je tloušťka vzorku (m)

Efektivní plochu měřicí elektrody je možné vypočítat podle vztahu [2]:

$$S_{ef} = \frac{\pi}{4} (d + c)^2 \quad (\text{m}^2) \quad (3.2)$$

kde  $d$  je průměr měřicí elektrody (m)  
 $c$  je šířka vzduchové mezery (m)

Průměr měřicí elektrody systému Tettex 2904 je 49,5 mm, šířka vzduchové mezery je 1 mm.

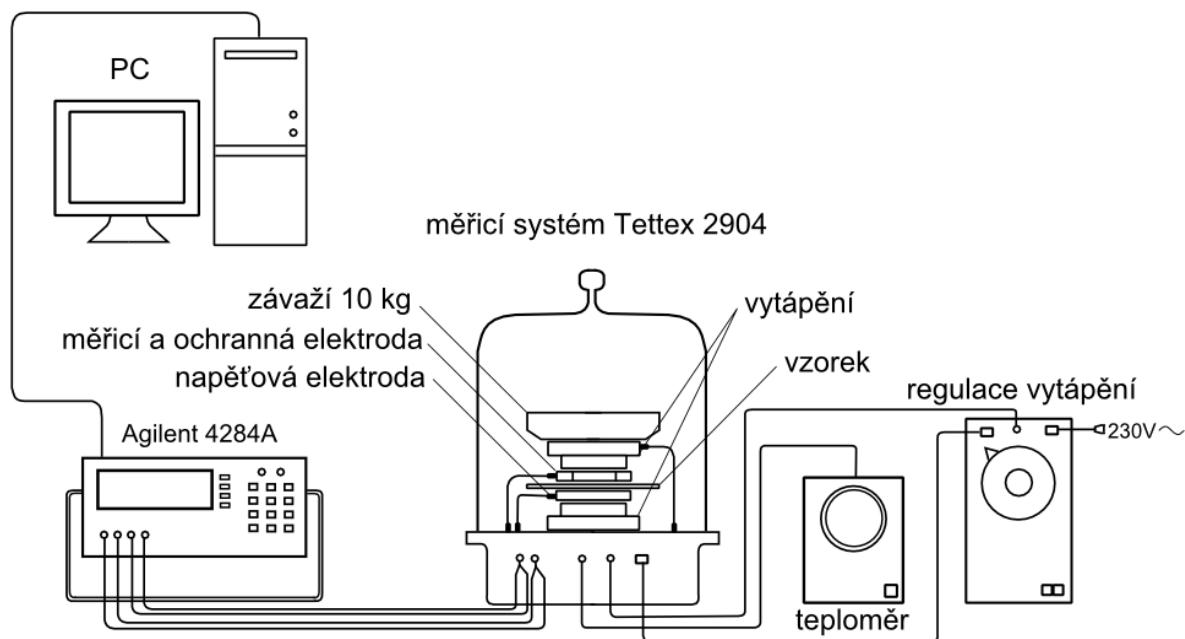
### **3.3.2 Měření v horkovzdušném sterilizátoru**

Měření dielektrických vlastností vzorků polyamidu plněných slídou bylo nejdříve prováděno v horkovzdušném sterilizátoru Stericell. Sterilizátor umožňuje nastavení teploty uvnitř komory do 250 °C. Do prostoru sterilizátoru byl umístěn tříelektrodový systém s průměrem měřicí elektrody 49,5 mm a šířkou mezery mezi měřicí a ochranou elektrodou 1 mm, který byl čtyřvodičově připojen k RLC měřiči Agilent 4284A. Vzorek určený pro měření byl vyjmut z exsikátoru s nulovou relativní vlhkostí vzduchu a urychleně vložen do elektrodového systému. Poté bylo do sterilizátoru vloženo větší množství vysušeného molekulového síta, aby se omezila možnost navlhnutí vzorků během měření. Před měřením byl přístroj kalibrován z důvodu eliminace parazitních impedancí a admitancí vodičů. RLC měřič Agilent 4284A byl připojen k počítači, na němž byl nainstalován program pro zaznamenávání měřených funkčních závislostí kapacity a ztrátového činitele. Ze získaných výsledků byly vypočteny složky komplexní permitivity. Z výsledných závislostí bylo patrné, že stabilizace vlhkosti vzorku není dostatečná, protože přes všechna opatření docházelo k navlhání vzorků během měření.

### **3.3.3 Měření pomocí systému Tettex 2904**

Kvůli navlhání vzorků bylo nutné vytvořit nové měřicí pracoviště, místo klimatické komory byl použit systém Tettex 2904, celý systém byl opět čtyřvodičově propojen s měřicím přístrojem Agilent 4284A. Vodiče bylo nejprve nutné vyrobit a stejně jako pro případ měření v horkovzdušném sterilizátoru provést kalibraci. Schématické znázornění zapojení měřicího pracoviště je znázorněno na obrázku 7.





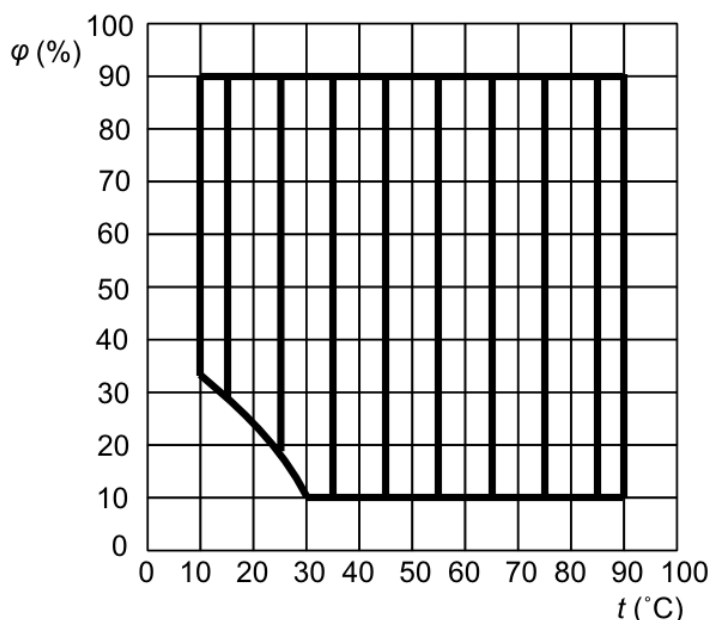
**Obr.7:** Zapojení pracoviště pro měření vysušených vzorků

Uvnitř systému Tettex 2904 byla opět udržována co nejnižší vlhkost pomocí vysušeného molekulového síta. Elektrodotový systém byl zatížen závažím o hmotnosti 10 kg. Vzorky byly opět několik dní před měřením uloženy v exsikátoru, kde vysychaly za přítomnosti vysušeného molekulového síta. Nejméně den před měřením byl vzorek vložen do systému Tettex 2904, a obložen velkým množstvím vysušeného molekulového síta. Poté se vyhřál na teplotu 130 °C, aby se zajistilo co nejdokonalější vysušení vzorku. Pokud by byly vzorky umístěny v prostředí s normální vlhkostí, docházelo by během měření teplotní závislosti dielektrických vlastností k vysoušení vzorků a výsledky by byly zatíženy chybou. Měření bylo opět plně automatizované, měřicí přístroj Agilent 4284A bylo možné ovládat pomocí speciálního počítačového programu. Byly nastavovány teploty 23° C, 50° C, 70 °C, 90 °C a 110 °C. Po dosažení požadované teploty uvnitř systému byly vzorky 15 minut temperovány a teprve poté proběhlo měření dielektrických veličin. Pro každou z teplot byla změřena závislost kapacity a ztrátového činitele  $tg \delta$  na frekvenci, která byla měněna od 100 Hz do 1 MHz.

### 3.3.4 Měření v klimatické komoře Climacell 111

Po měření vysušených vzorků následovalo měření navlhnutých vzorků, které probíhalo v klimatické komoře Climacell 111. Tato komora je určena pro aplikace, ve

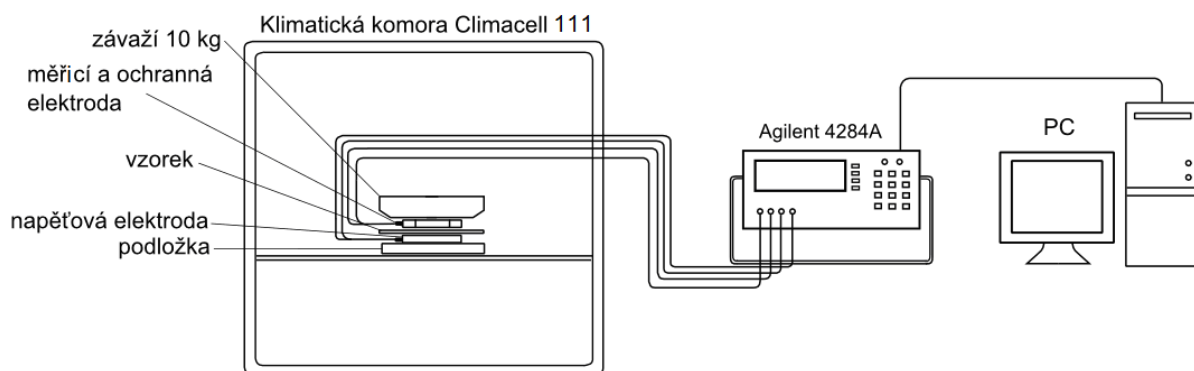
kterých je možné měnit teplotu vzorku od 0 °C do 99,9 °C a relativní vlhkost vzduchu v rozmezí 10 % až 90 % v různých časových režimech. Komora je vybavena mikroprocesorovým řízením, regulace teploty se provádí PID regulátorem s fuzzy (víceznačnou) logikou a teplotním čidlem PT 100, regulace vlhkosti se provádí opět PID regulátorem s fuzzy logikou a s vlhkosním kapacitním čidlem. Komora obsahuje také ventilátor, který má nastavitelnou rychlost od 0 do 100 % v desetiprocentních intervalech. Při měření byla rychlost nastavena vždy na 100 %. Vodiče je do komory možné přivést přes průchodky, které jsou umístěné v boční stěně komory. Vzájemný vztah provozní teploty  $t$  ve °C a provozní relativní vlhkosti  $\varphi$  v % při nastavování provozních parametrů komory ilustruje obrázek 8. Čárkovaná plocha vymezuje oblast dosažitelných provozních parametrů [5].



**Obr.8:** Oblast provozních parametrů komory

Schematické znázornění zapojení měřicího pracoviště je vidět na obrázku 9. Měření bylo opět plně automatizované a bylo stejně jako měření na vysušených vzorcích prováděno pomocí měřicího přístroje Agilent 4284A a speciálního programu. Použitý elektrodový systém byl stejný jako při měření na systému Tettex 2904, bylo také opět nutné vyrobit propojovací vodiče mezi elektrodovým systémem a měřicím přístrojem Agilent 4284A. Před měřením byla opět provedena kalibrace. V klimatické komoře Climacell 111 bylo provedeno měření dielektrických vlastností vzorků při relativních vlhkostech 33 % a 55 %. Vzorky byly před měřením dlouhodobě umístěny v exsikátoru s požadovanou vlhkostí. Relativní vlhkosti 33 % bylo v exsikátoru dosaženo pomocí nasyceného roztoku  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , relativní

vlhkosti 55 % bylo v exsikátoru dosaženo pomocí nasyceného roztoku  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Při měření v klimatické komoře byly nastavovány teploty 23 °C, 50 °C, 70 °C a 90 °C.

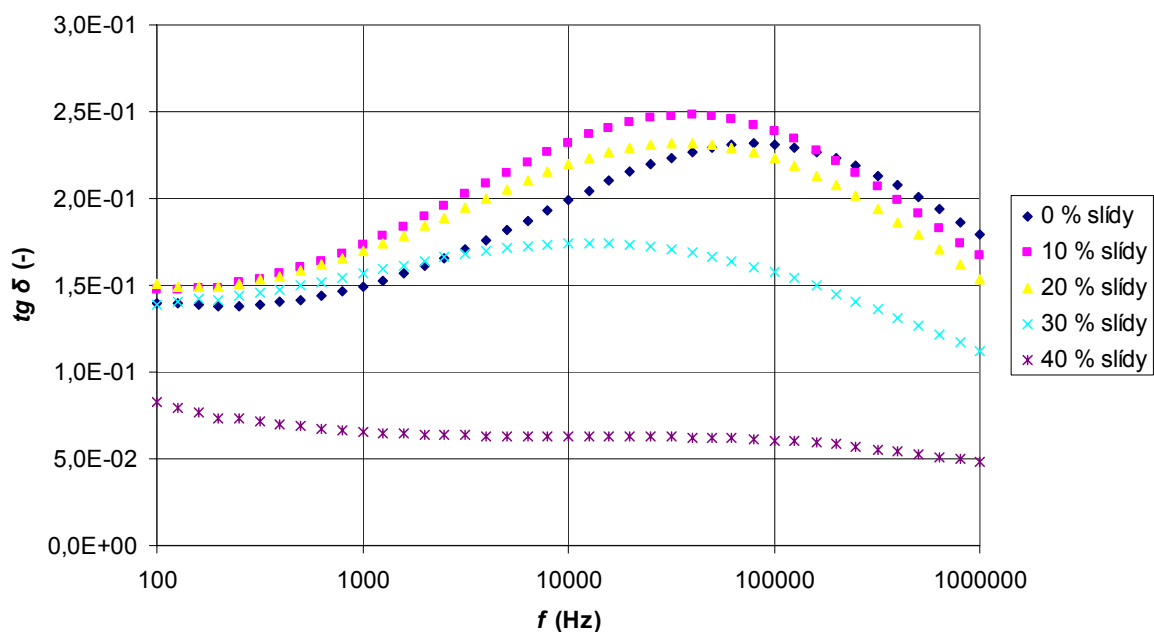


**Obr.9:** Zapojení pracoviště pro měření navlhnutých vzorků

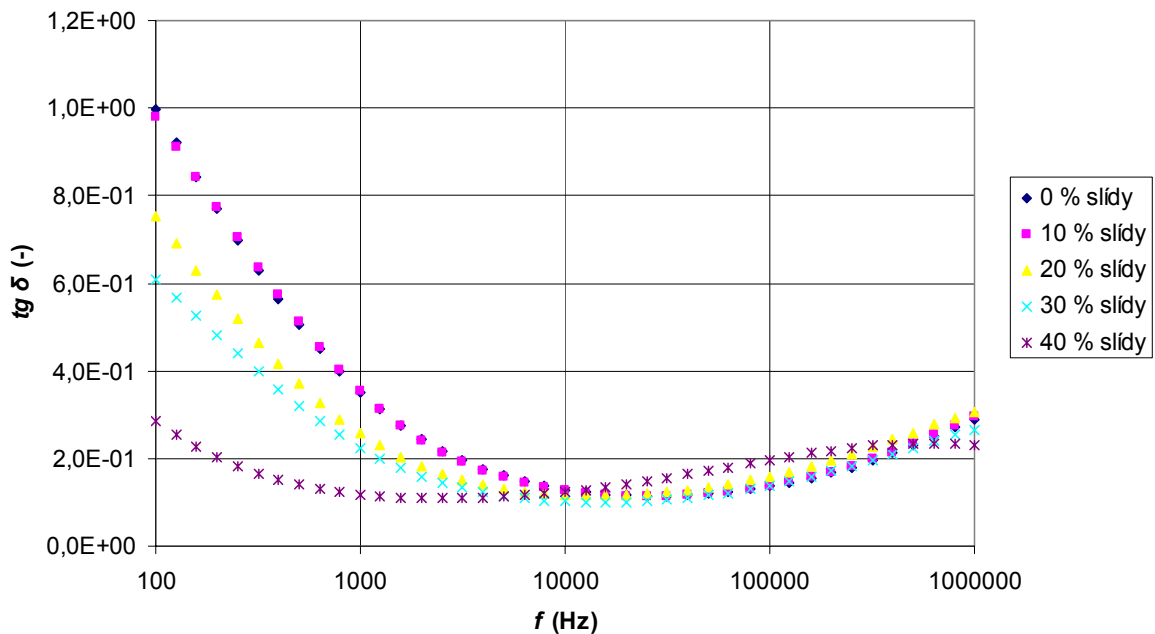
### 3.4 Výsledky měření

#### Výsledky měření ztrátového činitele v závislosti na frekvenci při různých teplotách a relativních vlhkostech

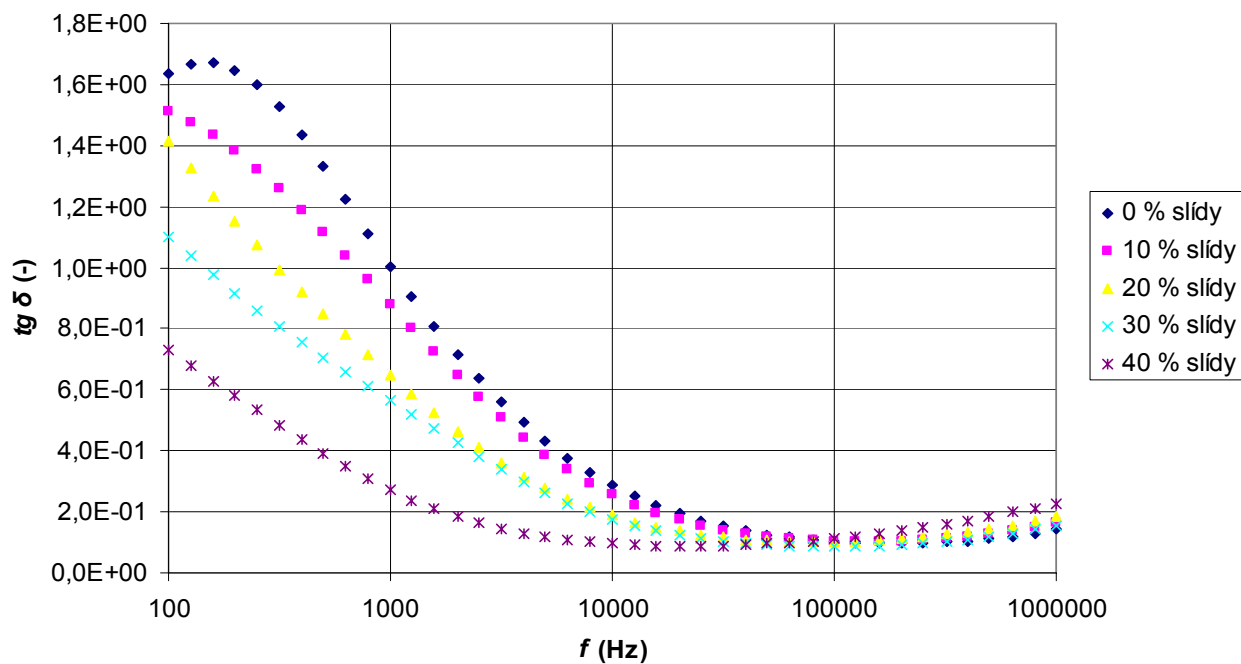
Nejdříve probíhalo měření na vysušených vzorcích, výsledky jsou zobrazeny na grafech 1 až 3.



**Graf 1:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci vysušených vzorků při teplotě 50 °C



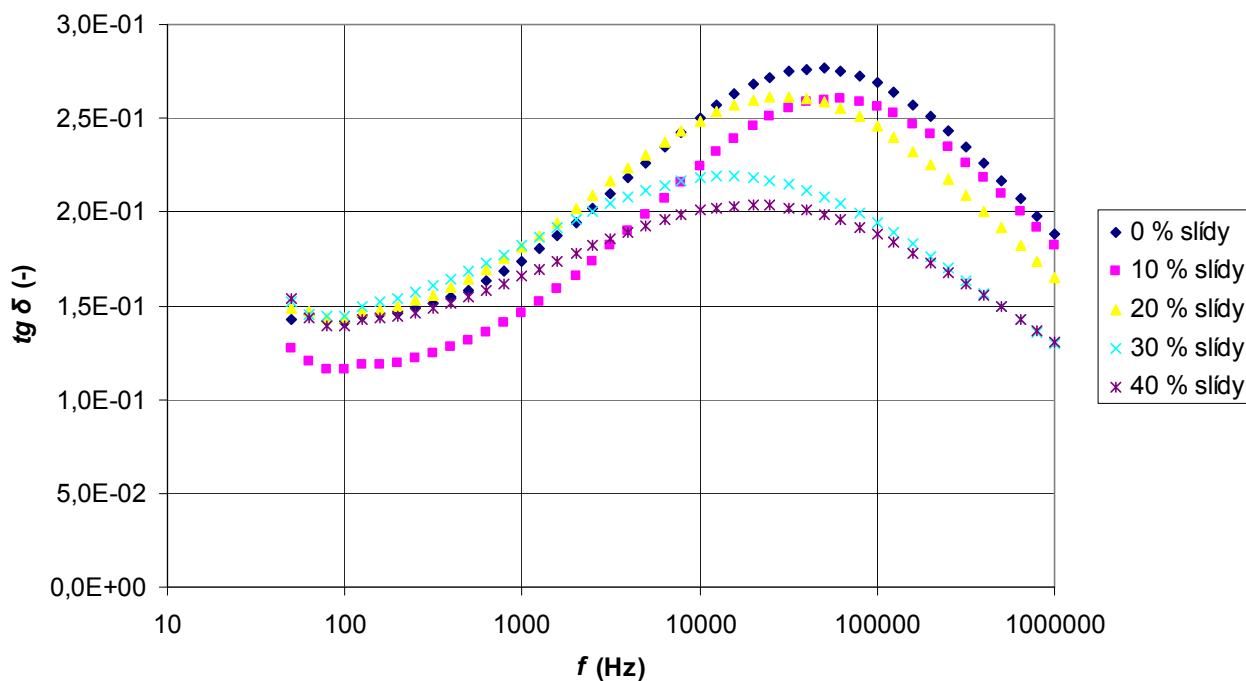
**Graf 2:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci vysušených vzorků při teplotě 90 °C



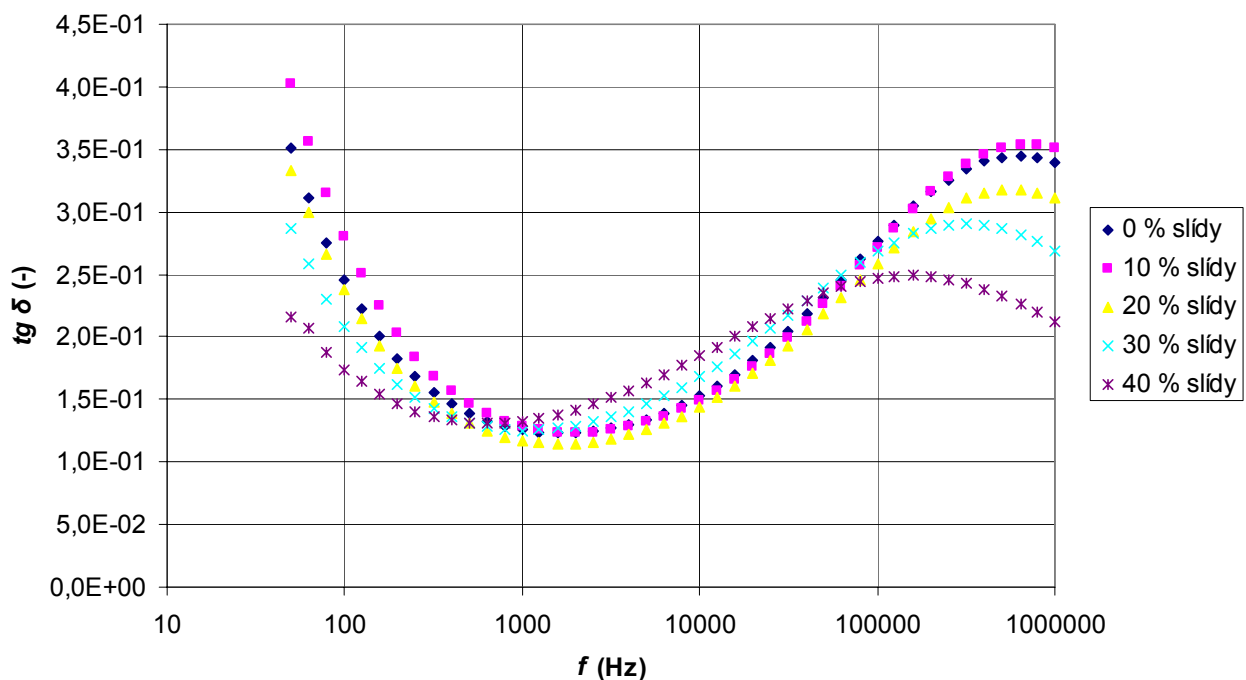
**Graf 3:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci vysušených vzorků při teplotě 110 °C.

Na grafických závislostech ztrátového činitele na frekvenci pro vysušené vzorky jsou vidět relaxační maxima, která se posunují k nižším kmitočtům se vzrůstajícím procentem plnění slídou.

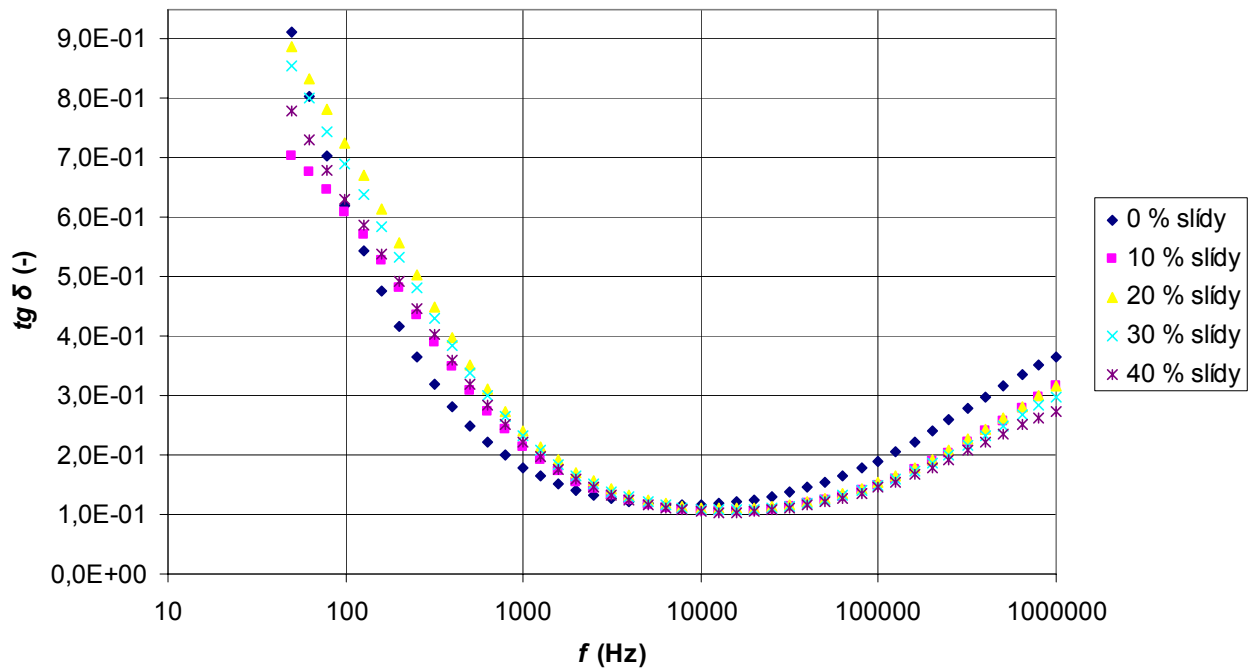
Výsledky měření při relativních vlhkostech vzduchu 33 % a 55 % jsou zobrazeny na grafech 4 až 9.



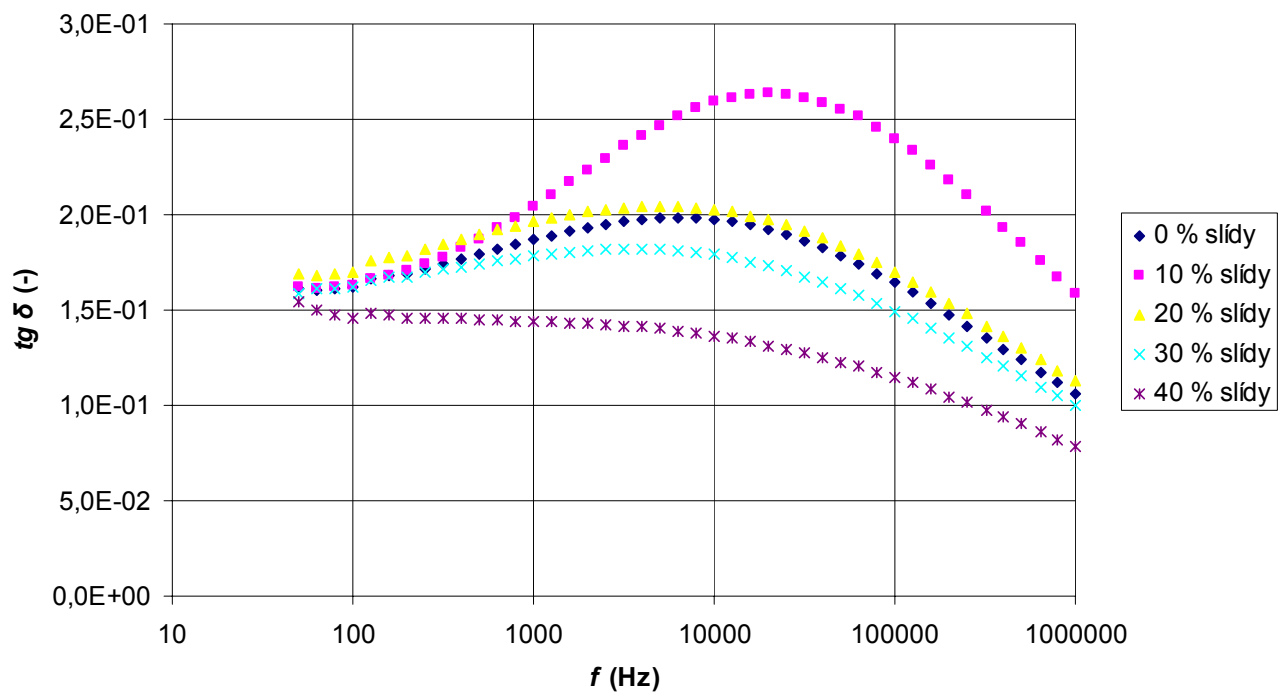
**Graf 4:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci při teplotě 50 °C a vlhkosti 33 %.



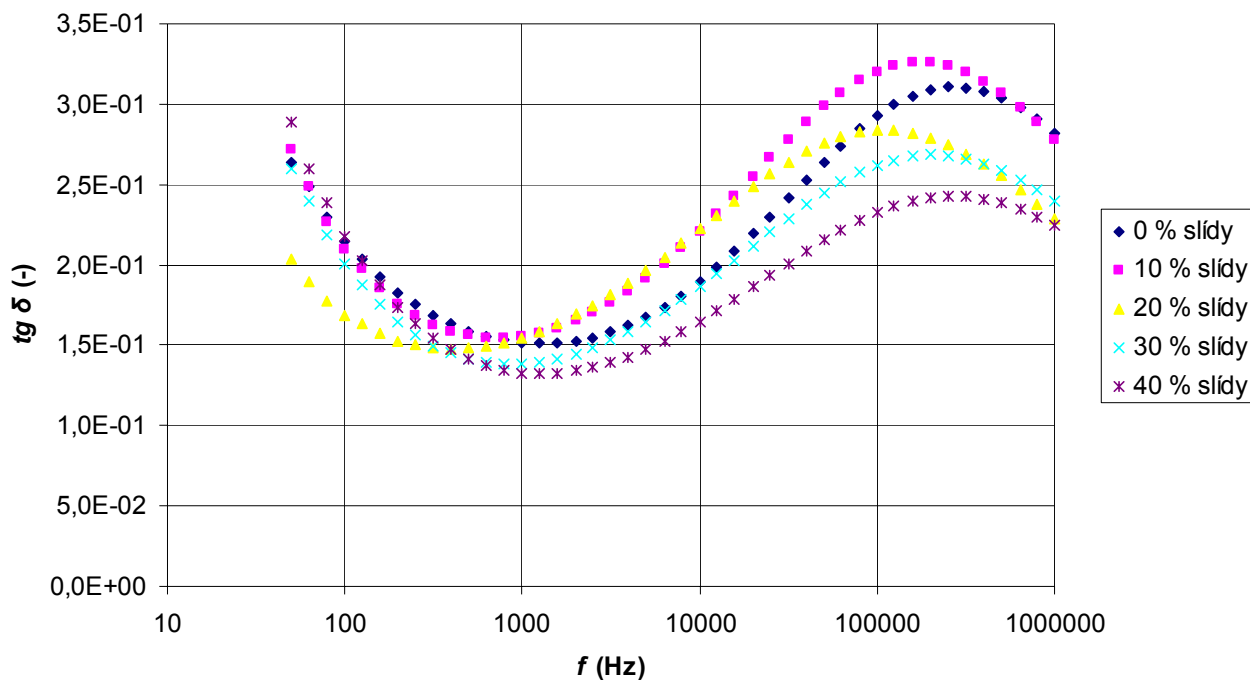
**Graf 5:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci při teplotě 70 °C a vlhkosti 33 %.



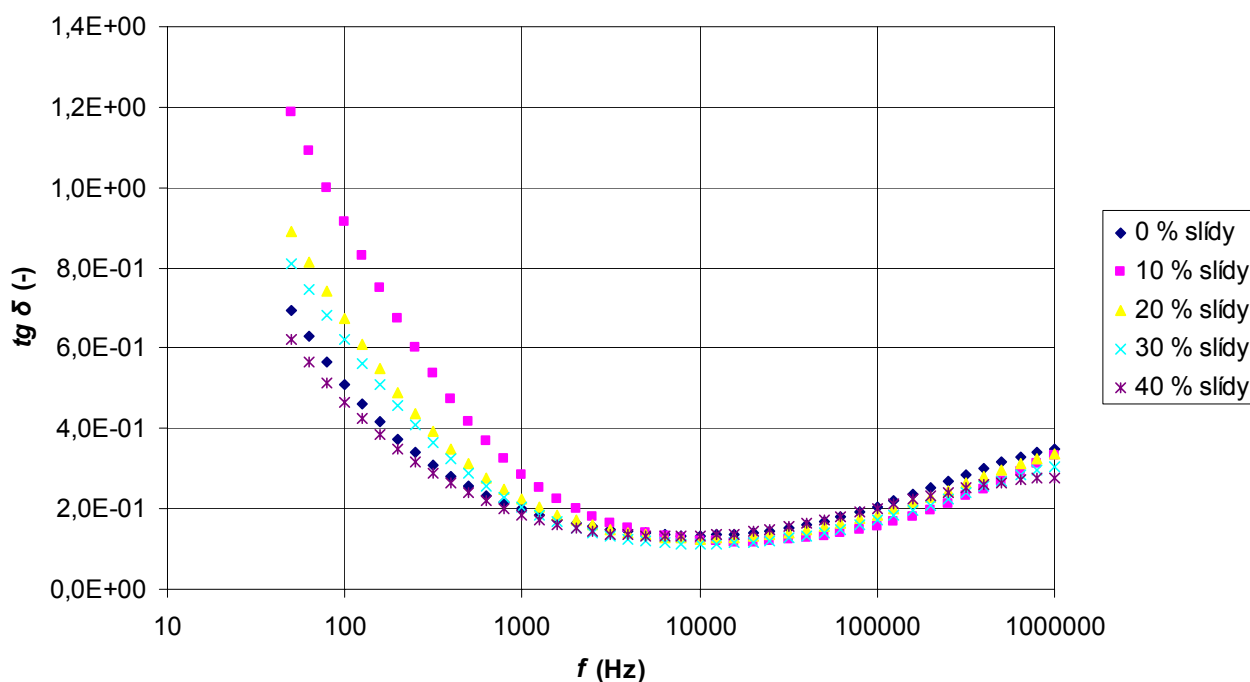
**Graf 6:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci při teplotě 90 °C a a vlhkosti 33 %.



**Graf 7:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci při teplotě 50 °C a vlhkosti 55 %.



**Graf 8:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci při teplotě 70 °C a vlhkosti 55 %.



**Graf 9:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci při teplotě 90 °C a vlhkosti 55 %.

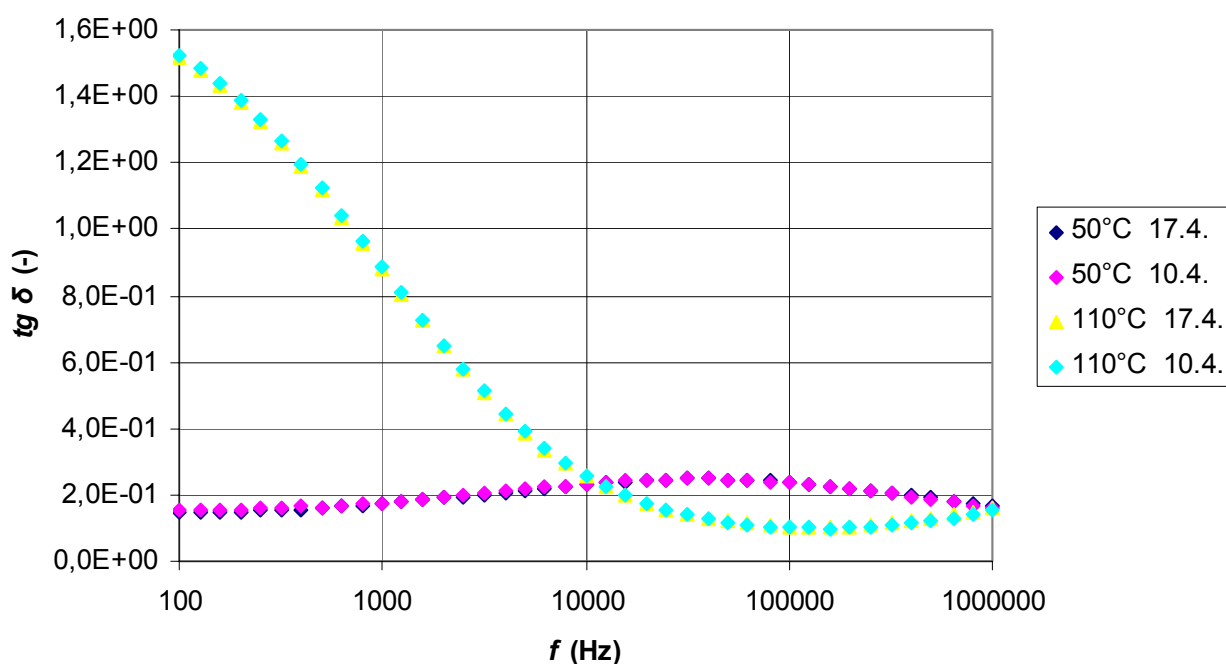
Na grafických závislostech ztrátového činitele na frekvenci pro navlhnuté vzorky jsou opět vidět relaxační maxima. Vzorek s 10% plněním vykazoval hodnoty



vyšší než se předpokládalo, proto bylo provedeno ověření reprodukovatelnosti měření (viz graf 10).

### Ověření reprodukovatelnosti měření

Ověření reprodukovatelnosti se provádělo na vzorku, který byl mezi jednotlivými měřeními uložen v exsikátoru. Na grafu 10 je znázorněno, jak se měnila hodnota ztrátového činitele vzorku s 10% plněním slídou, který byl mezi měřeními týden uložen v exsikátoru.



**Graf 10:** Závislost ztrátového činitele na frekvenci pro vzorek s 10% plněním slídou při 0% vlhkosti.

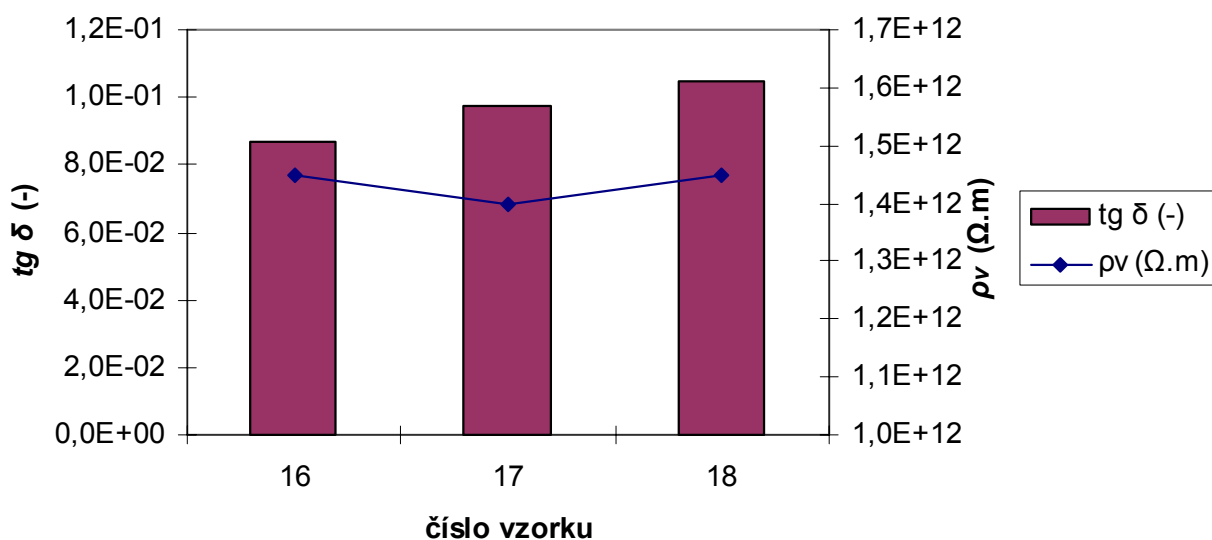
Z grafu 10 je patrné, že výsledky měření jsou téměř totožné a tudíž i reprodukovatelné.

## Výsledky měření ztrátového činitele při frekvenci 1 kHz a vnitřní rezistivity

Po ověření reprodukovatelnosti měření bylo provedeno měření ztrátového činitele a vnitřní rezistivity při vlhkosti okolí 35 %, teplotě 23 °C pro frekvenci 1 MHz na všech dostupných vzorcích, protože vzniklo podezření, že se jednotlivé vzorky stejného plnění liší svými dielektrickými vlastnostmi.

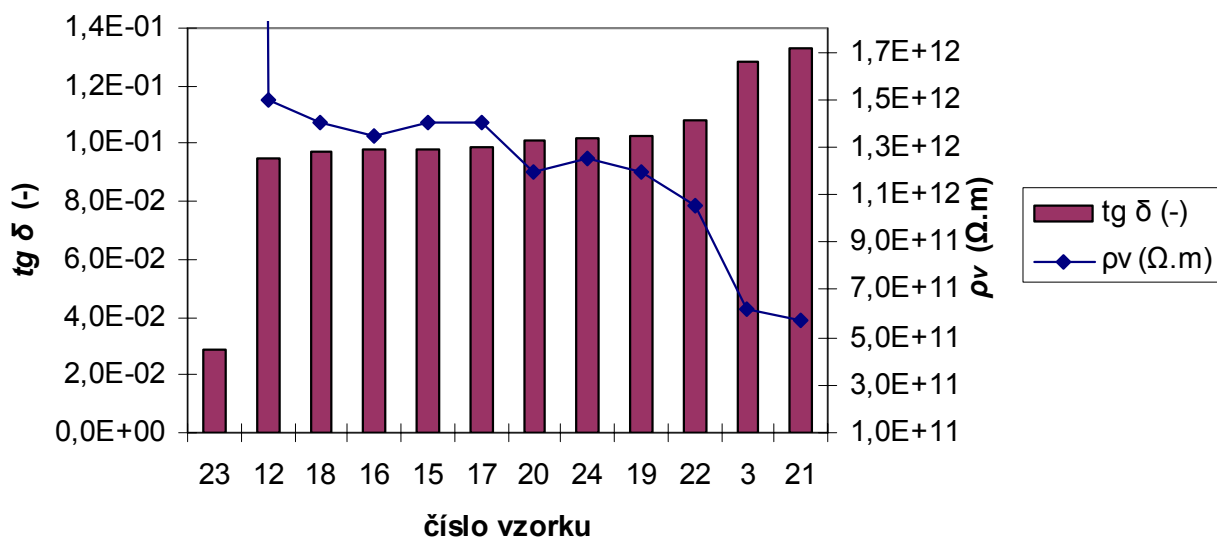
Vnitřní rezistivita byla měřena pomocí megaohmmetru IM6. Měření probíhalo v měřicím systému Tettex 2904, přiložené napětí činilo 500V.

### Vzorky polyamidu s 0 % plněním slídou



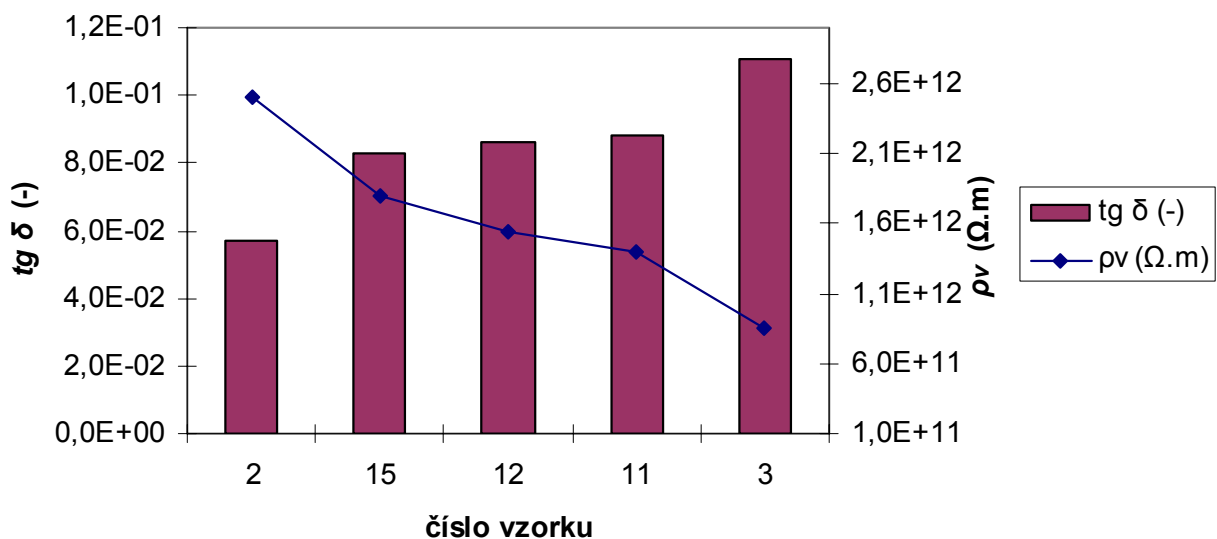
**Graf 11:** Závislost ztrátového činitele a vnitřní rezistivity na měřeném vzorku.

### Vzorky s 10 % plněním slídou



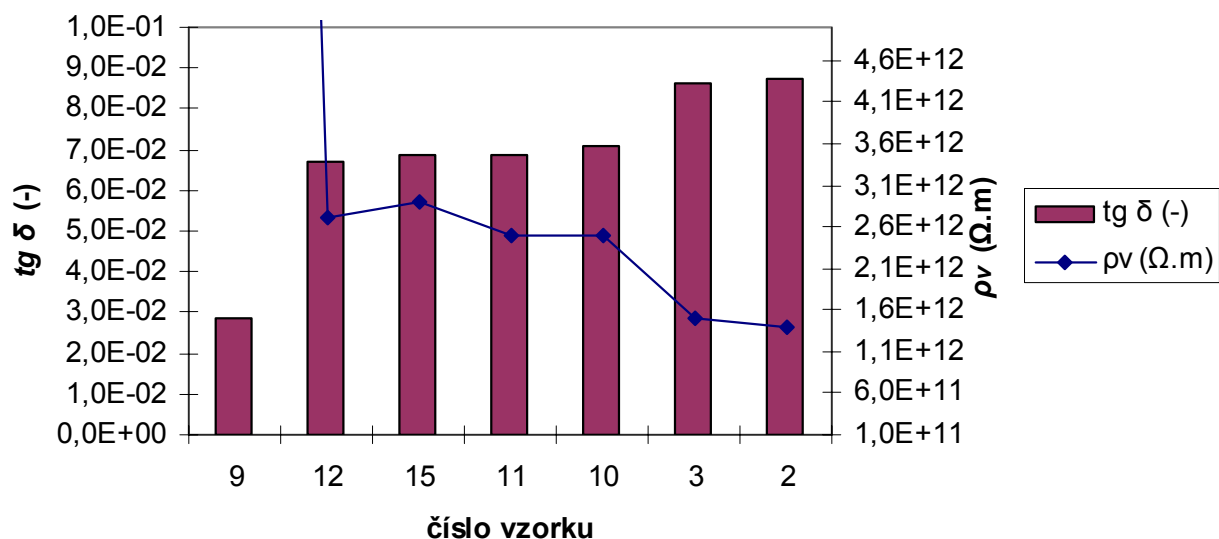
Graf 12: Závislost ztrátového činitele a vnitřní rezistivity na měřeném vzorku.

### Vzorky s 20 % plněním slídou



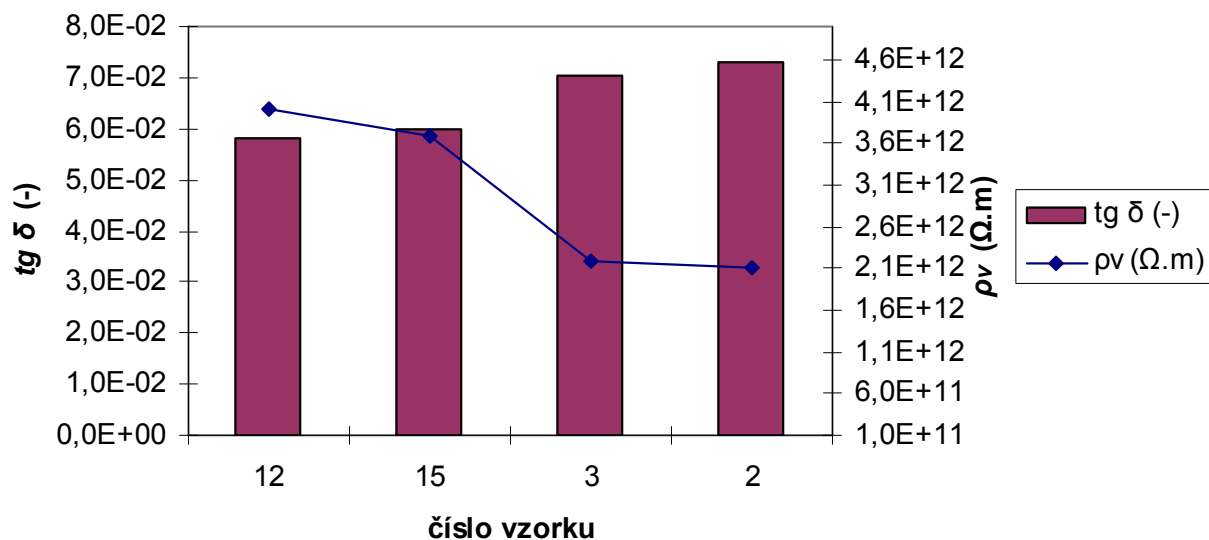
Graf 13: Závislost ztrátového činitele a vnitřní rezistivity na měřeném vzorku.

### Vzorky s 30 % plněním slídou



Graf 14: Závislost ztrátového činitele a vnitřní rezistivity na měřeném vzorku.

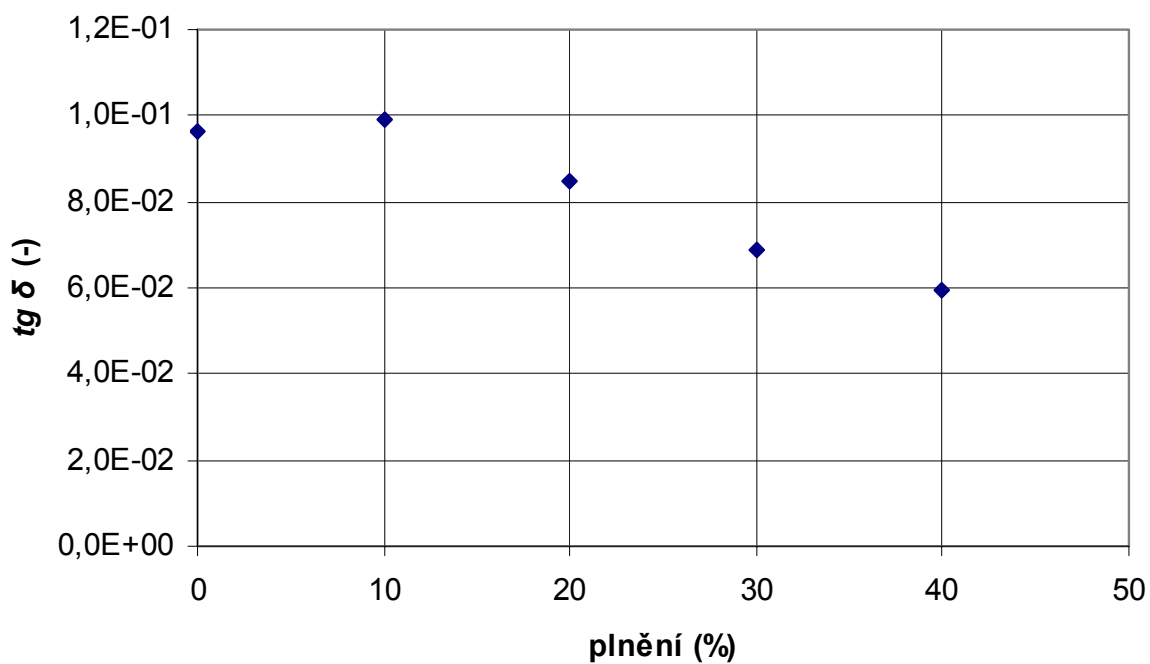
### Vzorky s 40 % plněním slídou



Graf 15: Závislost ztrátového činitele a vnitřní rezistivity na měřeném vzorku.

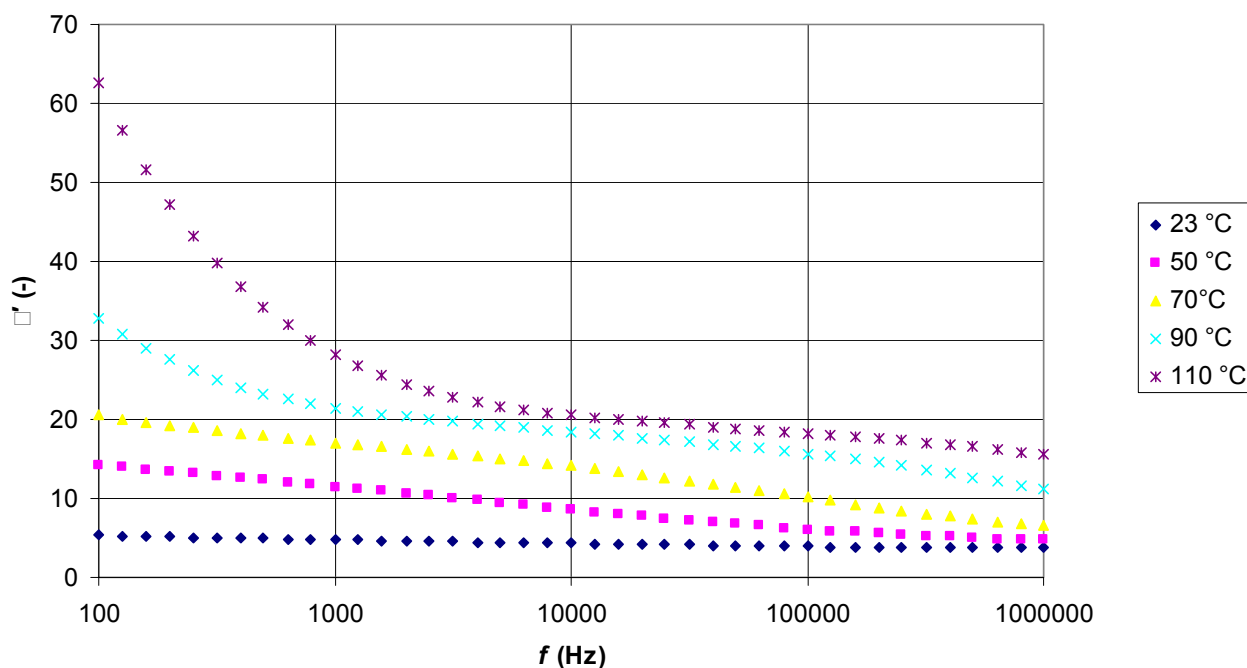
Z grafů 11 až 15 je patrné, že naměřené hodnoty ztrátového činitele a vnitřní rezistivity se u některých vzorků dané sady výrazně liší.

Pokud nebyly uvažovány hodnoty, které se výrazně lišily, tak bylo možné vytvořit grafickou závislost střední hodnoty ztrátového činitele na množství slídy ve vzorcích (viz graf 16).



**Graf 16:** Závislost střední hodnoty ztrátového činitele na množství slídy ve vzorcích

## Závislost relativní permitivity na frekvenci vysušeného vzorku s 20% plněním slídou pro různé teploty



**Graf 17:** Závislost reálné složky komplexní permitivity na frekvenci pro vzorek s 20% plněním slídou při 0 % vlhkosti.

Na grafu 17 je vidět, jak reálná složka komplexní permitivity vzorku s 20% plněním slídou roste s teplotou. To je způsobeno zvýšenou pohyblivostí dipólových molekul, které při vyšších teplotách snáze sledují změny elektrického pole a přispívají tak k reálné složce permitivity.

### Výpočet směsných vztahů.

Pro výpočet relativní permitivity byly použity Lichteneckerovy směsné vztahy (rovnice 2.29, 2.30, 2.31). Za parametr  $k$ , který je závislý na tvaru a orientaci částic složené soustavy, byly postupně dosazeny hodnoty 0, 1 a -1. Výpočet směsných vztahů byl také prováděn pro Maxwellův přístup (rovnice 2.25).

**Tab. 3:** Hodnoty pro výpočet směsných vztahů

hmotnostní procento plnění (%)	10	20	30	40
hmotnost celého vzorku (kg)	5,0118E-02	5,3313E-02	5,7910E-02	6,1123E-02
hmotnost slídy (kg)	5,0118E-03	1,0663E-02	1,7373E-02	2,4449E-02
hmotnost polyamidu (kg)	4,5106E-02	4,2650E-02	4,0537E-02	3,6674E-02
hustota slídy (kg.m <sup>-3</sup> )	2700	2700	2700	2700
hustota polyamidu (kg.m <sup>-3</sup> )	1150	1150	1150	1150
objem slídy (m <sup>3</sup> )	1,8562E-06	3,9491E-06	6,4344E-06	9,0553E-06
objem polyamidu (m <sup>3</sup> )	3,9223E-05	3,7087E-05	3,5250E-05	3,1890E-05
celkový objem vzorku (m <sup>3</sup> )	4,1079E-05	4,1036E-05	4,1684E-05	4,0946E-05
objemové procento slídy	0,0451866	0,0962343	0,1543624	0,2211538
objemové procento polyamidu	0,9548134	0,9037657	0,8456376	0,7788462
permitivita slídy (-)	5,5	5,5	5,5	5,5
permitivita polyamidu (-)	7,0	7,0	7,0	7,0
permitivita (-) (Lichtenecker, k=0)	6,92	6,84	6,74	6,64
permitivita (-) (Lichtenecker, k=1)	6,93	6,86	6,77	6,67
permitivita (-) (Lichtenecker k=-1)	6,91	6,82	6,72	6,60
permitivita (-) (Maxwell)	6,93	6,84	6,75	6,64
permitivita (-) při frekvenci 50 Hz, vlhkosti 33 % a teplotě 23°C (-)	6,74	6,42	5,96	5,59
rozdíl mezi vypočítanou permitivitou podle Lichteneckera (k=0) a změřenou permitivitou	0,18	0,42	0,78	1,05

V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty permitivit vypočítaných pomocí směsných vztahů. Současně jsou zde uvedeny hodnoty permitivit naměřené při frekvenci 50 Hz, teplotě 23 °C a 33% relativní vlhkosti. Hodnoty vypočtené pomocí směsných vztahů byly vyšší než naměřené hodnoty permitivit. Rozdíly naměřených a vypočtených hodnot se zvyšují se stoupajícím procentem plnění slídou. Je pravděpodobné, že ve vzorcích s vyšším hmotnostním plněním slídou je obsaženo i větší množství vzduchu, které snižuje naměřenou hodnotu relativní permitivity. Existuje také možnost, že povrch vzorků není dokonale rovný, což by v případě použitých

přítlačných elektrod vnášelo do měření další chybu, způsobenou přítomností vzduchu mezi elektrodou a vzorkem. Hodnota permitivity klesala se zvyšujícím se hmotnostním procentem plnění slídou, protože slída má nižší permitivitu než polyamid.

### **3.4. Vyhodnocení měření**

Předmětem diplomové práce bylo sledování vlivu plnění, teploty a vlhkosti na dielektrické veličiny, kterými byly ztrátový činitel a relativní permitivita. Měření probíhalo na vzorcích polyamidu PA6 s 10%, 20%, 30% a 40% hmotnostním plněním slídou. Pro měření byl náhodně vybrán z každé sady jeden vzorek, protože se předpokládala dostatečná homogenita všech vzorků v jednotlivých sadách. Z grafických závislostí ztrátového činitele na frekvenci, naměřených při 0% vlhkosti, je patrné, že čím vyšší bylo plnění slídou, tím nižší byly naměřené hodnoty ztrátového činitele. To je způsobeno tím, že slída má nižší ztrátový činitel než polyamid. Při zvyšování teploty bylo zjištěno, že hodnota ztrátového činitele stoupá, což odpovídá teoretickým předpokladům, protože polarizační ztráty (které tvoří podstatnou část celkových ztrát) jsou značně závislé na teplotě. Vypočítaná relativní permitivita klesá s rostoucí frekvencí, což je způsobeno tím, že s rostoucí frekvencí postupně ustávají jednotlivé druhy polarizací tak, jak klesá schopnost částic sledovat změny elektrického pole. Dochází tedy k poklesu reálné složky permitivity. Také byla posouzena reprodukovatelnost měření. Na sledovaném vzorku bylo provedeno několik měření, mezi kterými byl vzorek umístěn v exsikátoru. Výsledky opakovaných měření byly téměř totožné, měření tedy bylo reprodukovatelné.

Měření v klimatické komoře probíhalo při relativních vlhkostech 30 % a 55 % a to pouze do 90°C. Pro tato měření byly vybrány nové vzorky, které byly umístěny několik dní v exsikátoru, kde navlhly na požadovanou hodnotu. Ze změřených závislostí již nebyly zcela patrné rozdíly mezi vzorky s různým plněním, především hodnoty vzorku s 10% plněním byly výrazně posunuty k vyšším hodnotám, než se předpokládalo.

Vzhledem ke skutečnosti, že vzorek obsahující 10 % plniva opakovaně vykazoval výsledky, které neodpovídaly výsledkům naměřeným na vzorcích s rozdílným plněním, bylo provedeno kontrolní měření všech dostupných vzorků. Měřen byl ztrátový činitel při frekvenci 1 kHz a dále vnitřní rezistivita při relativní vlhkosti vzduchu 35 %. Hodnoty těchto veličin se u některých vzorků (a také u vzorku s 10% plněním, který byl měřen) stejného plnění výrazně lišily, a to i přes to, že byla u vzorků výrobcem garantována stejnorodost. Tyto rozdíly byly pravděpodobně



způsobeny tím, že v tryskách vstřikovacího zařízení zůstal materiál použitý při výrobě předchozích sad. Výrobce sice odstranil prvních 0,5 kg vyrobené směsi, avšak toto množství lze považovat na základě provedených měření za nedostatečné. Pro další experiment by měly být neshodné vzorky vyčleněny. Po vyloučení vzorků s krajními hodnotami bylo možné určit střední hodnoty ztrátového činitele  $tg \delta$  pro jednotlivé sady s různým plněním slídou. Střední hodnoty ztrátového činitele vzorků s 0% a 10% plněním jsou téměř shodné, odchylka obou hodnot spadá do rozsahu chyby měření. Je možno konstatovat, že vliv slídového plniva se začne výrazněji projevovat až při vyšších procentech plnění. Tuto skutečnost lze sledovat také na frekvenčních závislostech  $tg \delta$  vysušeného vzorku měřeného při 50 °C (graf č. 1), kde se vzorky s 0% a 20% hmotnostním plněním projevují téměř shodně. Snížení hodnoty  $tg \delta$  se projeví až při 30% resp. 40% plnění mletou slídou.

## 4 Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou kompozitních materiálů. Práce je členěna do několika částí.

V teoretické části je uvedena definice kompozitních materiálů a jejich klasifikace. Dále jsou zde popsána dielektrika, veličiny popisující jejich chování, popis polarizačních mechanismů (zvláštní pozornost je věnována relaxačním polarizacím) a ztráty, které vznikají v dielektrikách. Součástí teoretické části je také popis klimatických činitelů (teploty a vlhkosti), které mohou na dielektrikum působit. V poslední části je popsána teorie složené soustavy, ve které jsou uvedeny směsné vztahy pro výpočet permitivity složené soustavy.

V experimentální části je popsána výroba experimentálních vzorků a metoda měření. Dále jsou graficky uvedeny vybrané výsledky měření. Předmětem zkoumání byly vzorky polyamidu PA6 vyrobené v Polymer Institutu s.r.o. K dispozici byly vzorky plněné mletou slídou s 0%, 10%, 20%, 30% a 40% hmotnostním procentem plnění.

Byly sledovány základní dielektrické vlastnosti, relativní permitivita a ztrátový činitel ve frekvenční závislosti a dále byla proměřena vnitřní rezistivita. Bylo zjištěno, že pro vzorky s 0 – 20% plněním se sledované veličiny příliš nemění, rozdílné výsledky vykazovaly vzorky s vyšším plněním. Dále bylo zjištěno, že oproti tvrzení výrobce o homogenitě jednotlivých sad vzorků se některé vzorky parametrům dané sady výrazně vymykaly. V následujících experimentech by měly být tyto vzorky vyřazeny.

## 5 Seznam použitých zdrojů

- [1] KAZELLE, Jiří., LIEDERMANN, Karel., JIRÁK, Josef., HAVLÍČEK, Svatopluk., VANĚK, Jiří., ROZSÍVALOVÁ, Zdenka., SEDLAŘÍKOVÁ, Marie. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy* [online]. [cit. 2008-3-28]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 273 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ute.feec.vutbr.cz/plan.php?plan=1>>.
- [2] MENTELÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [3] MACHEK, Václav, SODOMKA, Jaromír. *Polymery a kompozity s polymerní matricí*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. 86 s.
- [4] LIEDERMANN, Karel., POLSTEROVÁ, Helena., ROZSÍVALOVÁ, Zdenka. *Klimatotechnologie* [online]. [cit. 2008-4-10]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 71 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ute.feec.vutbr.cz/plan.php?plan=5>>.
- [5] *Návod k použití : Chladicí inkubátor s řízenou vlhkostí CLIMACELL 111, 222, 404, 707*. Brno: [s.n.], 2001. 32 s.
- [6] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. 1. vyd. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. 81 s. ISBN 80-903386-0-7.
- [7] JIRÁK, Josef., AUTRATA, Rudolf., LIEDERMANN, Karel., ROZSÍVALOVÁ, Zdenka., SEDLAŘÍKOVÁ, Marie. *Materiály a technická dokumentace: Část materiály v elektrotechnice* [online]. [cit. 2008-4-10] Brno: Vysoké učení technické v Brně. 129 s. Dostupné z WWW: <[https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/ute/Materialy\\_a\\_technicka\\_dokumentace\\_S.pdf](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/ute/Materialy_a_technicka_dokumentace_S.pdf)>.