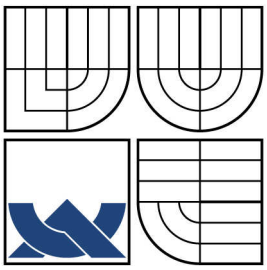
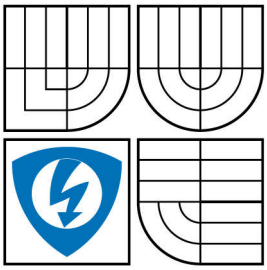


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

VLIV KLIMATICKÝCH PODMÍNEK NA VLASTNOSTI ELEKTROIZOLAČNÍCH LAKŮ

IMPACT OF THE CLIMATIC CONDITIONS UPON THE VARNISHES PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — JIŘÍ MIKOLÁŠ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ
SUPERVISOR

BRNO 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student:	Mikoláš Jiří	***ID:***	78625
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Vliv klimatických podmínek na vlastnosti elektroizolačních laků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s využitím dielektrické relaxační spektroskopie v časové a frekvenční oblasti, jako nedestruktivní diagnostické metody. Prostudujte teorii navlhavosti elektrotechnických materiálů.
Připravte sadu lakových vzorků s různým podílem mleté slídy.
U jednotlivých sad experimentálních vzorků sledujte vliv relativní vlhkosti na dielektrické vlastnosti; soustřeďte se zejména na frekvenční průběhy složek komplexní permitivity.
Výsledky měření na vzorcích s různým podílem plniva porovnejte z pohledu míry navlhavosti a velikosti dielektrických ztrát.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání:	11.2.2008	***Termín odevzdání:***	30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsívalová

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Licenční smlouva
poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	Jiří Mikoláš
Bytem:	Velké Bílovice, Revoluční 1102, 691 02
Narozen/a (datum a místo):	11.2.1986, Valtice

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   - □ disertační práce
   - □ diplomová práce
   - ☒ bakalářská práce
   - □ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv klimatických podmínek na vlastnosti elektroizolačních laků

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zdenka Rozsívalová

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 pořizovaní 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 tísni 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:

Práce se zabývá sledováním vlivu navlhání na dielektrické vlastnosti kompozitního materiálu. Tento kompozitní materiál je tvořen epoxidovým lakem TSA 220S společnosti Epoxylite Ltd. a mikromletou slídou v různých hmotnostních procentech. Experiment byl prováděn metodou dielektrické relaxační spektroskopie ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz. Základním výsledkem práce jsou frekvenční závislost složek komplexní permitivity kompozitního materiálu, který byl vystaven různým relativním vlhkostem prostředí.

Abstract:

This bachelor's project analysis influence of moisture absorption on dielectric properties of composite material, which was exposured various relative humidity. The composite material consist of epoxide varnish EPOXYLITE TSA 220S by company Epoxylite Ltd. with various weight percentage number micro-ground mica. This experiment was carried out by dielectric relaxation spectroscopy with frequency range from 100 Hz to 1 MHz. Elementary results of this project are composite material frequency dependencies of component part of complex permittivity.

Klíčová slova:

lak TSA 220S, vytvrzení, navlhání, dielektrické vlastnosti, slída

Keywords:

varnish TSA 220S, hardening, moistening, dielectric properties, mica

Bibliografická citace díla:

MIKOLÁŠ, J. *Vliv klimatických podmínek na vlastnosti elektroizolačních laků.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsívalová.

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 vedoucí semestrálního projektu Ing. Zdence Rozsívalové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpravování mé bakalářské práce.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ **8**

ÚVOD **10**

1 TEORETICKÝ ROZBOR **11**

1.1 DIELEKTRIKA – ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI 11
1.1.1 Klasifikace molekul podle způsobu uspořádání vázaných nábojů *11*
1.2 DIELEKTRICKÁ POLARIZACE 11
1.2.1 Druhy polarizací *12*
1.3 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY 13
1.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST 14
1.5 ELEKTROIZOLAČNÍ LAKY 15
1.5.2 Přehled elektroizolačních laků *16*
1.5.1 Epoxidové pryskyřice *16*
1.6 SLÍDA 16
1.6.1 Obchodní druhy slídy *17*
1.6.2 Slídové výrobky *17*
1.7 VLHKOST PLYNŮ – ZÁKLADNÍ POJMY 17
1.7.1 Příprava prostředí pomocí nasycených roztoků *18*

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST **20**

2.1 POPIS POUŽITÉ EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE 20
2.2 POPIS POUŽITÉ SLÍDY 21
2.3 POPIS POUŽITÝCH FOREM PRO VYTVRZENÍ 21
2.4 PŘÍPRAVA LAKOVÝCH VZORKŮ 21
2.5 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE 22
2.6 VÝPOČTY SLOŽEK KOMPLEXNÍ PERMITIVITY 23
2.6.1 Tloušťky lakových vzorků *24*
2.7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ 25
2.7.1 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak bez plnění slídou *25*
2.7.2 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak se 4 % plněním slídou *27*
2.7.3 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak s 8 % plněním slídou *29*
2.7.4 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak s 12 % plněním slídou *31*
2.7.5 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak bez plnění slídou *33*
2.7.6 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak se 4 % plněním slídou *35*
2.7.7 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak s 8 % plněním slídou *37*
2.7.8 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak s 12 % plněním slídou *39*
2.7.9 3D zobrazení frekvenční závislosti relativní permitivity na zvyšující se vlhkosti *41*
2.7.10 3D zobrazení frekvenční závislosti ztrátového čísla na zvyšující se vlhkosti *43*

3 ZÁVĚR **45**

4 POUŽITÁ LITERATURA **46**

5 PŘÍLOHY **47**

Seznam symbolů

C	[F]	kapacita
C_0	[F]	geometrická kapacita
c	[m]	šířka vzduchové mezery mezi měřicí a stínící elektrodou tříelektrodového systému
d_m	[m]	průměr měřicí elektrody
E	[Vm^{-1}]	intenzita výsledného elektrického pole
E_0	[Vm^{-1}]	intenzita vnějšího elektrického pole
f	[Hz]	frekvence
h	[m]	tloušťka dielektrika
J_P	[Am^{-2}]	proudová hustota děr
M_{H_2O}	[kg]	hmotnost vodní páry
$M_{H_2O}^{nas}$	[kg]	hmotnost nasycené vodní páry
M_{VP}	[kg]	celková hmotnost vlhkého plynu
M_{SP}	[kg]	hmotnost suchého plynu
n	[m^{-3}]	koncentrace polarizovatelných částic
P	[Cm^{-2}]	polarizace (vektor)
q	[C]	elektrický náboj
ρ_V	[Ωm]	vnitřní rezistivita
V	[m^3]	objem
γ_P	[S]	povrchová konduktivita
γ_V	[Sm^{-1}]	vnitřní konduktivita
δ	[rad]	ztrátový úhel
ε_r	[-]	relativní permitivita

$\varepsilon(\omega)$	[-]	komplexní permitivita
ε'	[-]	reálná složka komplexní permitivity (relativní permitivita)
ε''	[-]	imaginární složka komplexní permitivity (ztrátové číslo)
ε_0	[Fm^{-1}]	permitivita vakua (8,854.10^{-12} Fm^{-1})
μ	[$m^2V^{-1}s^{-1}$]	driftová pohyblivost
μ_i	[Cm]	dipólový moment
Φ	[-]	absolutní vlhkost
Φ	[-]	absolutní vlhkost při nasycené vodní páře
φ	[-]	relativní vlhkost
ω	[$rads^{-1}$]	kruhový kmitočet

Úvod

Se stále vzrůstajícími požadavky na veškeré materiály používané v elektrotechnickém průmyslu je kladen důraz i na nevodivé materiály – izolanty. Při jejich použití se zaměřujeme jak na – v dnešní době nadmíru aktuální – ochranu životního prostředí, tak také na jejich základní vlastnosti. Těmi jsou dobrá elektrická a tepelná odolnost a odolnost především při působení klimatických činitelů a jejich změn.

Hlavní náplní bakalářské práce bylo zjistit, jak se bude projevovat zvyšování relativní vlhkosti na dielektrických vlastnostech zkoumaného vytvrzeného laku TSA 220S s 0%, 4%, 8% a 12% hmotnostním přídavkem mikromleté slídy. Dále seznámení se s tím, jak se přidaná slída projeví na vlastnostech vzorku, čili vliv na kapacitu a následně na permitivitu a ztrátové číslo.

Experiment byl proveden pomocí tříelektrodového měřicího systému nedestruktivní metodou dielektrické relaxační spektroskopie v rozsahu od 100 Hz do 1 MHz. Vzorky laku byly postupně vystavovány vlivu 5 %, 33 %, 55 %, 75 % a 93 % relativní vlhkosti. Základním výstupem jsou frekvenční závislosti složek komplexní permitivity, z nichž jsou pro větší přehlednost odvozeny další závislosti.

1 Teoretický rozbor

1.1 Dielektrika – základní vlastnosti

Nevodiče, jinak též dielektrika nebo izolanty, jsou látky, které neobsahují volné nosiče náboje. Molekuly jsou v dielektriku pevně vázané elektrostatickým polem a nemohou se tudíž vlivem vnějšího elektrického pole pohybovat. Dielektrika jsou navenek elektricky neutrální, a to i tehdy, mají-li molekuly nevodiče vlastní dipólový moment.

Skutečnost je ale taková, že musíme vždy uvažovat „reálné dielektrikum“, tedy látku, která obsahuje kromě vázaných elektrických nábojů i elektrické náboje volné, které jsou schopny se pohybovat. Reálné dielektrikum má velmi malou elektrickou vodivost. Předpokládá se, že se jedná o vodivost iontového charakteru, kde tyto volné náboje jsou ionty nečistot a příměsí.

Někdy nastává problém rozlišit pojmy „dielektrikum“ a „izolant“. Pojem „dielektrikum“ se používá ve vztahu s polarizovatelností a schopností akumulovat elektrickou energii, naproti tomu „izolant“ používáme v souvislosti se schopností látky vzájemně izolovat vodivé části s různým potenciálem.

1.1.1 Klasifikace molekul podle způsobu uspořádání vázaných nábojů

- molekuly nepolární – vázané elektrické náboje jsou rozloženy souměrně a jejich těžiště splývají. Jejich stavba je zcela symetrická, ale při působení elektrického pole je tato symetrie porušena – nepolární molekula vytvoří elektrický dipól a nabude indukovaný elektrický moment.

- molekuly polární – i v nepřítomnosti elektrického pole se vyznačují stálým elektrickým momentem. Při působení elektrického pole se dipólové molekuly stáčejí do směru pole – získají indukovaný dipólový moment (ten se vektorově skládá se stálým dipólovým momentem). Stavba polárních molekul je nesymetrická.

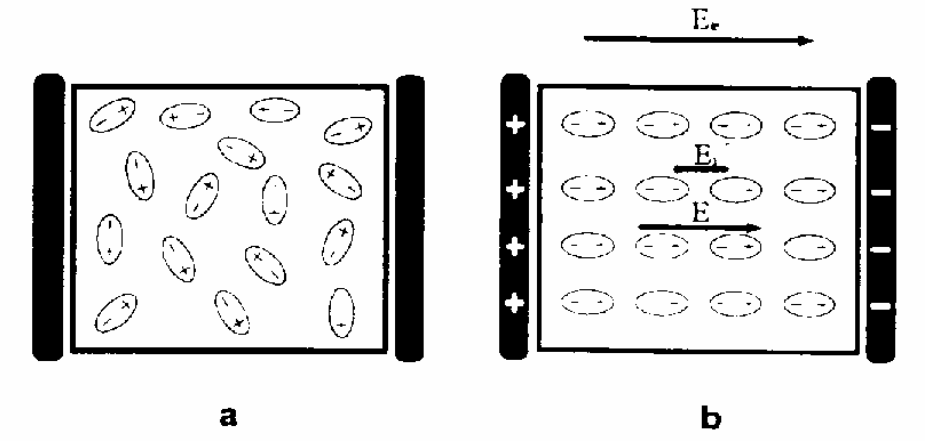
1.2 Dielektrická polarizace

Polarizace je fyzikální jev, který nastává při vložení dielektrika do elektrického pole. Vzniknou vázané dvojice elektrických nábojů (elektrické dipóly - molekuly dielektrika, u nichž vlivem deformace elektrickým polem nejsou shodná těžiště

kladného a záporného náboje).

Polarizací dielektrika se intenzita vnějšího pole zeslabuje, neboť vnitřní pole polarizovaného dielektrika je opačného směru než je intenzita vnějšího pole. Poměr intenzity vnějšího elektrického pole E_0 k intenzitě výsledného elektrického pole E udává relativní permitivita dielektrika ε_r.

$$\varepsilon_r = \frac{E_0}{E} \tag{1}$$



Obr.1: a) Molekuly dielektrika s vlastním dipólovým momentem jsou v nepřítomnosti vnějšího pole náhodně orientovány. b) Zpolarizované dielektrikum vnějším elektrickým polem

Mírou polarizace dielektrika je fyzikální veličina relativní permitivita a vektor polarizace P. Ten vyjadřuje velikost dipólového momentu μ_i jednotkového objemu V.

$$P = \frac{\sum \mu_i}{V} \tag{2}$$

1.2.1 Druhy polarizací

U dielektrik se v mnoha případech vyskytuje několik druhů polarizací. Některé z nich jsou dominantní a překryjí slabší typy polarizací.

Pružné polarizace – jevy s rychlým průběhem, též nazývány pružné. Vyznačují se extrémně krátkou dobou trvání a to bez ztráty energie. Jedná se o posun pružně vázaných nábojů z rovnovážných poloh v částicích dielektrika. Nejsou závislé ani na teplotě ani na frekvenci. K pružným polarizacím řadíme elektronovou a iontovou - pružnou polarizaci.

Elektronová polarizace – vyskytuje se ve všech atomech. Při působení vnějšího elektrického pole dojde k posunu nábojů vázaných v atomech na vzdálenosti menší než jsou rozměry molekul nebo atomů. Doba ustanovení je řádově v rozsahu 10^{-16} až 10^{-14} s.

Iontová pružná polarizace – vyskytuje se v iontových krystalech. Vázané ionty (elektrostatickými silami) se při působení vnějšího pole pružně posunou.

Pomalé (relaxační) polarizace – po přiložení elektrického pole přibývá pomalu. Po odpojení zase pomalu odeznívá. Tyto polarizace jsou značně teplotně závislé a vždy dochází ke ztrátám energie v dielektriku. Časový průběh doznívání je exponenciální, charakterizovaný časovou konstantou (relaxační dobou) τ (s). K pomalým relaxacím řadíme: polarizaci dipólovou (u polárních látek, doba ustanovení 10^{-12} až 10^{-8} s) a polarizaci iontovou - relaxační (v iontových látkách s netěsným uložením iontů se stejně dlouho dobou ustanovení jako v případě polarizace dipólové).

Zvláštní polarizace – polarizace mezivrstvová

– polarizace samovolná

– polarizace trvalá

– polarizace rezonanční

Polarizace mezivrstvová – ze zvláštních polarizací se vyskytuje nejčastěji. Probíhá u nehomogenních dielektrik s vodivými nebo polovodivými příměsemi nebo nečistotami. Je ze všech polarizací nejpomalejší. Příčinou je migrace volných, nebo slabě vázaných nábojů v látce při působení vnějšího elektrického pole. Tato polarizace je nepružná a dochází při ní ke ztrátám energie.

1.3 Dielektrické ztráty

Ztráty energie v dielektriku jsou způsobeny vznikem nestacionárních pochodů uvnitř dielektrika. Tyto nestacionární pochody jsou podmiňovány přiloženým elektrickým polem.

U dielektrik ztráty představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce při jeho vložení, ať do střídavého, nebo do stejnosměrného pole. Dielektrikum se ohřívá a mění se fázový úhel mezi napětím a proudem. V ideálním

případě, u kondenzátoru s dielektrikem připojeného na střídavé napětí, předbíhá proud napětí o fázový úhel $\varphi = 90^{o}$. V praxi platí, že je tento úhel menší o ztrátový úhel δ.

Podle fyzikální podstaty dělíme dielektrické ztráty na:

- vodivostní
- polarizační
- ionizační

Vodivostní ztráty – jejich fyzikální podstatou je pohyb a srážení volných nosičů nábojů s částicemi tvořícími strukturu látky. Důsledkem je přeměna elektrické energie v Jouleovo teplo a to jak při střídavém i stejnosměrném napětí. Vyskytují se u všech druhů dielektrik.

Polarizační ztráty – jsou podmíněny polarizačními procesy v dielektriku a mají významný podíl na celkových ztrátách. Nejvyšší ztráty, a také ztráty nejvíce závislé na teplotě a frekvenci vznikají při dipólové a iontové relaxační polarizaci. U elektronové a iontové polarizace se prakticky nevyskytují. Dále do polarizační ztrát řadíme ještě takové ztráty, které se v dielektriku projeví až při frekvencích světelného spektra – rezonanční ztráty.

Ionizační ztráty – podmínkou jejich vzniku je překročení prahu ionizace daného plynu. Vyskytují se převážně u plynů, ale i u pevných a kapalných dielektrik – v tomto případě je podmínkou, že obsahují plynové dutinky.

Velikost dielektrických ztrát můžeme vyjádřit

- ztrátovým úhlem (δ) (je mírou nedokonalosti dielektrika)
- ztrátovým činitelem (tg δ)
- ztrátovým číslem (ε'')
- měrnými dielektrickými ztrátami (ztrátový výkon vztažený na objem látky)

1.4 Elektrická vodivost

Tato fyzikální veličina popisuje, jak je daná látka schopná vést elektrický proud – spočívá v pohybu volných, nebo slabě vázaných nábojů v elektrickém poli.

U dielektrik je požadavek mít ji co nejmenší.

Závisí na druhu nosičů elektrického náboje (velikosti náboje, driftové pohyblivosti a jejich koncentraci)

Vnitřní konduktivita

$$\gamma_V = n \cdot q \cdot \mu \tag{3}$$

kde n je koncentrace nosičů elektrického náboje, q je náboj nosiče elektrického náboje a μ je driftová pohyblivost

Povrchová konduktivita

$$\gamma_P = \frac{J_P}{E} \tag{4}$$

Podle toho, co je příčinou vodivosti u dielektrik, dělíme vodivost na iontovou, elektronovou a elektroforetickou.

1.5 Elektroizolační laky

Jedná se o koloidní disperze (směs malých – koloidních částic rozptýlených v druhé látce) tuhých i kapalných látek v rozpouštědlech a ředidlech. Tato rozpouštědla a ředidla jsou důležitá spíše při přípravě laku, jinak představují neaktivní složky.

Elektroizolační laky používáme především pro vyplnění všech volných míst v izolaci elektrotechnických zařízení při jejich impregnaci vytvořením suchého lakového povlaku s nepatrnou hydroskopičností. Díky tomu má izolace vyšší elektrickou pevnost a zlepší se i její tepelná vodivost.

Před použitím necháváme laky schnout, nebo je vypalujeme. Nejprve je třeba z laku odstranit rozpouštědla a ředidla. V dalším kroku právě schnutím a vypalováním mění filmotvorné složky laku svoji chemickou strukturu a pochody polykondenzačními, polyadičními a oxidací přecházejí v pevnou makromolekulární látku.

1.5.2 Přehled elektroizolačních laků

Elektroizolační laky lze rozdělit:

a) podle chemické povahy filmotvorných složek dělíme laky na:

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

b) podle užití

- impregnační laky pro izolanty s vláknitou strukturou (například pro impregnaci tkaniny, skleněných vláken nebo celulózového papíru)
- impregnační laky pro vinutí
- ochranné laky pro desky plošných spojů
- laky na dráty
- lepicí laky a povrchové laky

1.5.1 Epoxidové pryskyřice

Jedná se o bezrospouštědlové laky, jejichž filmotvornou složkou jsou syntetické pryskyřice.

Epoxidové pryskyřice patří v rozdělení izolantů do matrice reaktoplastů, kompozitů – složených materiálů, představujících směsnou soustavu, schopných vytvářet prostorové struktury. Vznikají polykondenzačními reakcemi - epichlorhydrinu (C_3H_5ClO) s diany (C_3H_8).

1.6 Slída

Slída – hlinitokřemičitan s plošnou strukturou patřící mezi přírodní makromolekulární anorganické izolanty společně s azbestem a keramikou. Tato skupina izolantů má velmi dobré elektrické vlastnosti, výborně odolávají elektrickým obloukům. Vyznačují se značnou stabilitou, tzn. neměnností charakteristických vlastností s časem díky iontové vazbě.

Slída je výborným izolantem, její ztrátový činitel *tg δ* se pohybuje v rozmezí

10^3 - 10^{-4}. Vnitřní rezistivita $\rho_v = 10^{12}$ Ωm.

1.6.1 Obchodní druhy slídy

- bloková (tabulková)
- kalibrovaná – pro vakuovou a kondenzátorovou techniku
- štípaná
- mletá
- mikromletá

1.6.2 Slídové výrobky

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

1.7 Vlhkost plynů – základní pojmy

Vzduch kolem nás je tvořen směsí plynů, především dusíku, kyslíku a argonu. Takový vzduch nazýváme suchý. Rozeznáváme ještě vlhký vzduch, což je suchý vzduch obsahující navíc vodní páru.

Absolutní vlhkost - jinak nazývaná hustota vodní páry, nebo též měrná hmotnost vodní páry, je celkové hmotnostní množství vodní páry v jednotce objemu zkoumaného vlhkého plynu. Je přímo spjata s počtem molekul vody v jednotkovém objemu vzduchu, tj.

$$\Phi = \frac{M_{H_2O}}{V} \tag{5}$$

kde M_{H_2O} je celková hmotnost vodní páry obsažené v plynu a V objem zkoumaného vlhkého plynu

Měrná vlhkost – podíl hmotnosti vodní páry k celkové hmotnosti vlhkého plynu. Udává tedy klikatinu z hmoty celku tvoří voda. Je-li q_{SH} rovno 0, máme suchý plyn,

naopak je-li q_{SH} rovno 1, hovoříme o čisté vodní páře.

$$q_{SH} = \frac{M_{H_2O}}{M_{VP}} = \frac{M_{H_2O}}{M_{SP} + M_{H_2O}} \tag{6}$$

kde M_{H_2O} je celková hmotnost vodní páry obsažené v plynu, M_{VP} celková hmotnost vlhkého plynu, M_{SP} je celková hmotnost suchého plynu

Relativní vlhkost – udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par obsažených v plynu k množství vodní páry, kterou by obsahoval stejný objem vzduchu, kdyby byl při stejné teplotě vodními parami nasycen. Relativní vlhkost lze též vyjádřit jako podíl skutečné absolutní vlhkosti plynu a absolutní vlhkosti téhož plynu za stejné teploty, pokud by byla vodní pára nasycená.

$$\varphi = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O}^{nas}} = \frac{\Phi}{\Phi_{nas}} \tag{7}$$

kde M_{H_2O} je celková hmotnost vodní páry obsažené v plynu, $M_{H_2O}^{nas}$ je hmotnost vodní páry, jíž byl nasycen objem vzduchu, Φ je skutečná absolutní vlhkost plynu a Φ_{nas} vyjadřuje absolutní vlhkost vzduchu při nasycené vodní páře.

1.7.1 Příprava prostředí pomocí nasycených roztoků

Pokud budeme mít v uzavřené nádobě čistou kapalnou vodu, vytvoří se nad její hladinou prostředí o relativní vlhkosti 100 %. Změna nastane, rozpustíme-li ve vodě množství jiné látky (obvykle různé soli). Dochází k rozpouštění přidané látky a některé její molekuly zaujímají místa na povrchu roztoku a brání vypařování vody. Docílí se snížení tlaku nasycené vodní páry nad hladinou roztoku – vytvoření prostředí menší relativní vlhkostí než 100 %. Vlhkost dále snižujeme přidáváním více rozpouštěné látky až do doby, než se vytvoří nasycený roztok (na dně je vidět nerozpuštěná látka, tento proces je závislý na teplotě). Od tohoto okamžiku se relativní vlhkost ustálí a je přesně daná. Pro laboratorní účely dostavení určitých hodnot relativní vlhkosti se používají především nasycené roztoky solí:

- chlorid lithný LiCl (φ = 11 %)
- chlorid hořečnatý $MgCl_2$ (φ = 33 %)
- bromid sodný NaBr (φ = 59 %)
- chlorid sodný NaCl (φ = 75 %)

- chlorid draselný KCl (φ = 85 %)
- dusičitan draselný KNO_3 (φ = 93 %)

Uvedené hodnoty relativních vlhkostí pro jednotlivé soli jsou vždy při teplotě 20 ℃.

2 Experimentální část

2.1 Popis použité epoxidové pryskyřice

V experimentu byl použit vysoce kvalitní epoxidový impregnační lak EPOXYLITE TSA 220S anglické firmy Epoxylite Ltd. Jedná se o jednosložkovou, čirou epoxidovou pryskyřici, jantarové barvy.

Tento lak se vyznačuje vysokou výchozí viskozitou 5000 mPas při 25 ^{o}C a velmi strmým poklesem viskozity po zahřátí. To znamená, že po zahřátí se TSA 220S stává podstatně tekutější, čehož bylo v tomto experimentu také využito při odlévání laku do forem.

Lak je vytvrzován při 165 ^{o}C. Doba gelovatění je 6 minut, po 12 hodinách je zcela vytvrzen.

Tab. 1: Vlastnosti tvrzené pryskyřice [10]

Tvrdost D podle Shorea	(DIN 53505)	92 (25 ℃)
Tepelná třída	(ASTM D1207/20000hod.)	220 ℃
Tepelná zeskelnění	(IEC 1006)	150 ℃
Pevnost v tahu	(ISO 527)	110 N mm^{-2}
Poměrné prodloužení při přetržení	(ISO 527)	2,5 %
Součinitel teplotní roztažnosti	(DIN 53752)	50.10^{-6} K^{-1}
Tepelná vodivost	(ISO 8894-1)	0,21 WmK^{-1}
Zápalnost	(UL 94)	--
Absorpce vody	(ISO 62)	0,12% (23 ℃)
Dielektrická pevnost	(IEC 243-1)	260 kV cm^{-1}
Relativní permitivita	(IEC 250)	3,6 při 20 ℃
Ztrátový činitel	(IEC 250)	0,003 při 20 ℃
Měrný (objemový) odpor	(IEC 93)	10^{13} Ωcm

2.2 Popis použité slídy

Mikromletá slída firmy Merck s označením 1.04750.1000 je nerostná surovina vyrobená mletím slídy nebo slídových odpadů (muskovit) na velikost částic menších než 15 μm. Mletá slída neobsahuje vodivé částice.

2.3 Popis použitých forem pro vytvrzení

Epoxidový lak, ať čistý, nebo s příměsí slídy, byl odléván a vytvrzován ve formách z polytetrafluoretylenu (PTFE). Ty se totiž, po předchozích pokusech s nanášením laku na kovové plíšky, osvědčily jako lepší. Teflon má dlouhodobou tepelnou stabilitu, jde o termoplast, tudíž je pro tyto experimenty ideální.

K dispozici byly formy s objemem komolého rotačního kužele 5 ml a 8,7 ml a formy s válcovým objemem 13 ml.

2.4 Příprava lakových vzorků

Do lihem vyčištěných teflonových forem byl injekční stříkačkou vpraven daný objem epoxidového laku. Nejprve čistý lak bez příměsi slídy, později bylo přidáno 4, 8 a 12 hmotnostních procent mikromleté slídy. Lak se slídou byl důkladně promíchán pomocí ultrazvuku, čímž se zvýšila teplota, viskozita klesla a lak se lépe rozléval do forem. Bublinky, které se po vylití do formy objevily na povrchu vzorku byly odstraněny preparační jehlou.

Po optické kontrole byly vzorky vloženy do laboratorního horkovzdušného sterilizátoru STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu, kde byly při teplotě 165 ^{o}C po dobu 12 hodin vytvrzovány.

Vytvrzené vzorky, především pak se slídou, měly nerovnoměrnou tloušťku a byly mírně prohnuté. To bylo alespoň částečně odstraněno pomocí brusného papíru. Sebemenší vzduchová mezera, vzniklá mezi vytvrzeným vzorkem a elektrodovým systémem, představovala sériově připojenou kapacitu vzduchového kondenzátoru ke kondenzátoru tvořeného vytvrzeným vzorkem. Výsledkem byla menší kapacita a tedy snížení hodnot relativní permitivity.

Před vlastním měřením byl připraven exsikátor s požadovanou hodnotou relativní vlhkosti. Téměř nulové hodnoty relativní vlhkosti se docílí molekulovým sítem. Pro vyšší relativní vlhkost se vyžilo nasyceného roztoku destilované vody s příslušnou solí, která při pokojové teplotě zajišťuje relativní vlhkost, viz. tabulka 2. Vzorky byly pro každou vlhkost vloženy v exsikátoru vždy po dobu 7 dní a relativní vlhkost byla průběžně kontrolována digitálním vlhkoměrem.

Tab. 2: Použité soli

Sůl	***φ***
$MgCl_2$	33
$Mg(NO_3)_2$	55
NaCl	75
KNO3	93

2.5 Měřicí přístroje

Měřicí ústrojí tvořil tříelektrodový elektrodový systém HP 16451B, viz. obrázek 2. Tvoří jej měřicí, napěťová a stínící elektroda.

Obr.2: Tříelektrodový systém HP 16451B [10]

Elektrodový systém byl připojen na LCR metr HP 4284A, viz obrázek 3. Vzorek se z exsikátoru přímo zasouvá mezi elektrody. LCR metr proměřoval jeho kapacitu a ztrátový činitel při frekvencích od 100 Hz do 1 MHz. Pro zajištění odpovídajících klimatických podmínek i během měření byl elektrodový systém umístěn v klimatické komoře CLIMACELL 111.

Obr. 3: LCR metr HP 4284A [9]

2.6 Výpočty složek komplexní permitivity

Hodnoty kapacity a ztrátového činitele se díky propojení LCRmetru HP s počítačem pomocí speciálního softwaru zaznamenávaly do MS Excel, čímž se velmi usnadňuje práce. Bylo potřeba vypočítat složky komplexní permitivity.

Pomocí vztahu [5] se určí geometrická kapacitu vzorku.

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{\pi \cdot (d_m + c)^2}{4h} \tag{5}$$

kde d_m je průměr měřicí elektrody (38 mm), c je vzdálenost mezi měřicí a stínící elektrodou (2 mm), h je tloušťka vzorku (viz. tabulky 3 – 6)

Podílem změřené kapacity C_x a geometrické kapacity C_0 jsme vypočetli relativní permitivitu ε' - podle vztahu [6].

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0} \tag{6}$$

Pro výpočet ztrátového čísla (imaginární část komplexní permitivity) byl použit vztah [7], udávající závislost mezi ztrátovým činitelem a složkami komplexní permitivity.

$$tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{7}$$

kde ε'' je ztrátové číslo a ε' je relativní permitivita

Konečné vyhodnocení měření proběhlo grafickým zpracováním frekvenčních závislostí složek komplexní permitivity při relativních vlhkostech 5 %, 33 %, 55 %, 75 % a 93 %. Bylo též zkoumáno, jak se ve výsledku projeví přidaná slída.

2.6.1 Tloušťky lakových vzorků

Tloušťky lakových vzorků uvedené v následujících tabulkách jsou aritmetickým průměrem deseti hodnot měřených náhodně na ploše vzorku.

Tab. 3: Tloušťky vytvrzených lakových vzorků

Vzorek	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
***h* [mm]**	2,445	2,227	2,304	2,843	2,624	2,699	2,818	3,980	4,486

Tab. 4: Tloušťky vytvrzených lakových vzorků se 4 % slídy

Vzorek	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
***h* [mm]**	2,705	2,120	2,361	2,953	2,824	3,128	3,212	4,325	5,393

Tab. 5: Tloušťky vytvrzených lakových vzorků s 8 % slídy

Vzorek	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
***h* [mm]**	2,964	2,320	2,248	2,997	3,011	3,021	3,101	5,113	5,344

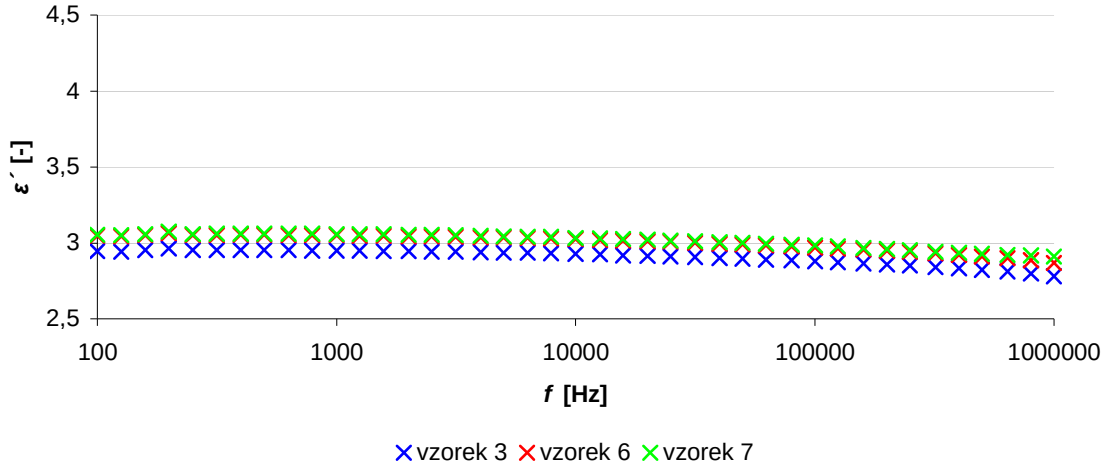
Tab. 6: Tloušťky vytvrzených lakových vzorků s 12 % slídy

Vzorek	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
***h* [mm]**	3,004	2,305	2,394	3,123	3,478	3,104	3,321	4,624	5,480

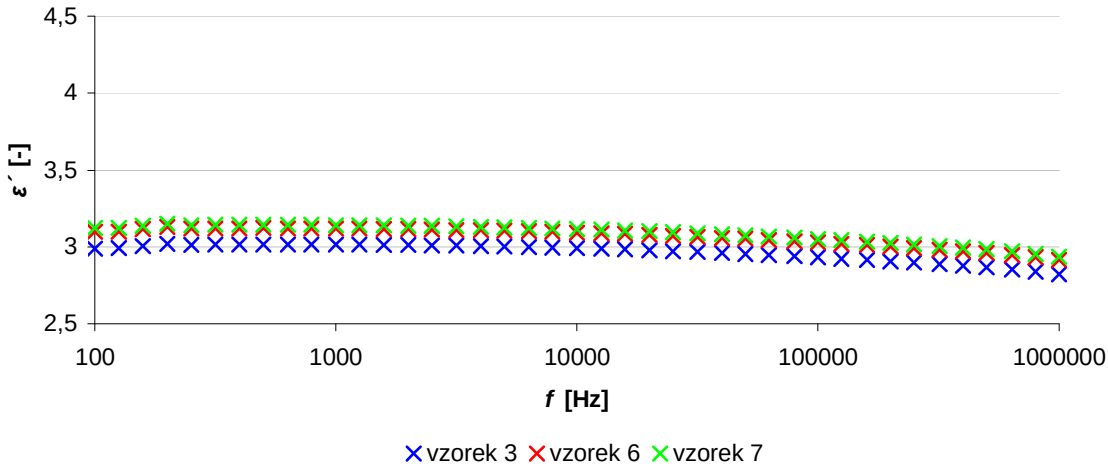
2.7 Výsledky měření

2.7.1 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak bez plnění slídou

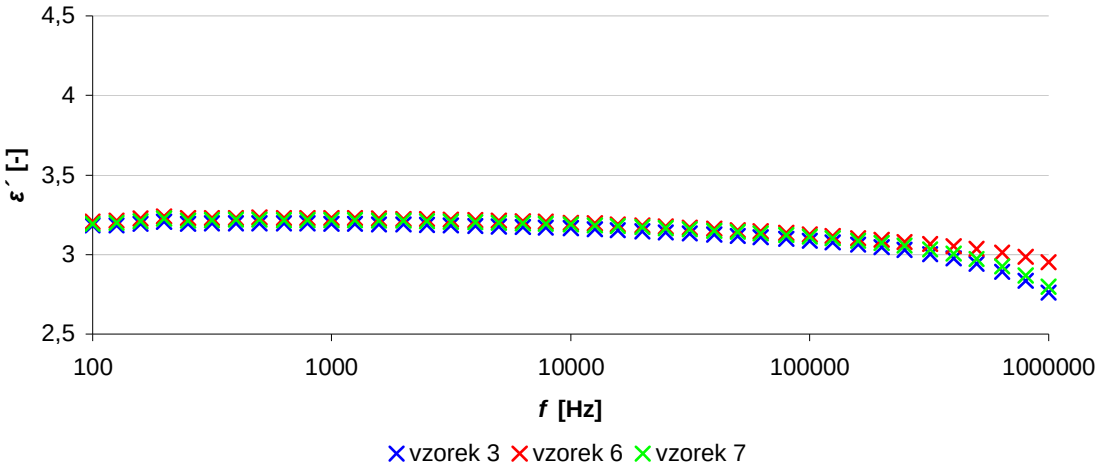
Jedná se o vzorky vytvrzeného čistého laku (bez příměsi slídy). Pro přehlednost byly vybrány tři vzorky, jejichž dielektrické vlastnosti a jejich změna si byly během procesu navlhání nejvíce podobné. Relativní permitivita, jak je patrné z obrázků 4 až 8, během zvyšující se vlhkosti stoupala. U vysušených lakových vzorků je relativní permitivita při výchozí frekvenci 100 Hz blízká hodnotě 3 a s frekvencí mírně klesá. Se zvyšující se vlhkostí vykazuje relativní permitivita od hodnoty frekvence přibližně 100 kHz strmější pokles.



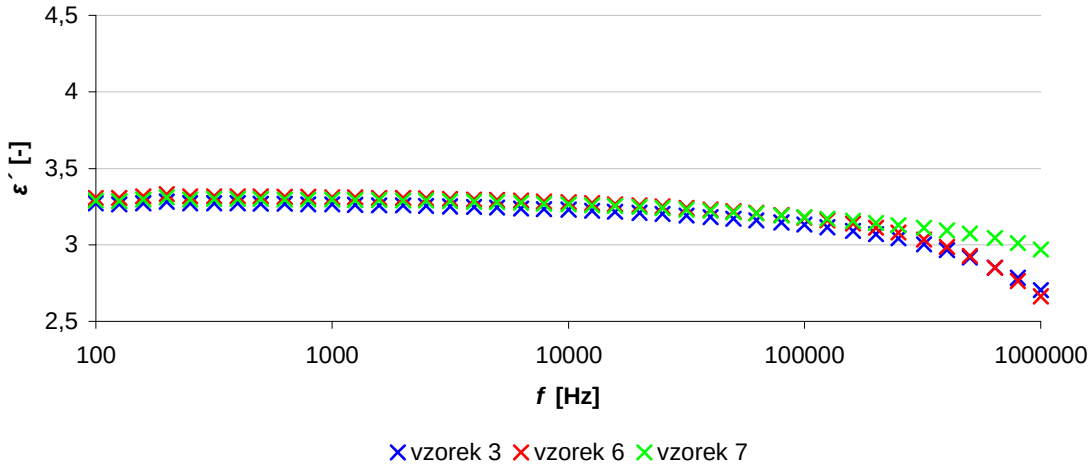
Obr. 4: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 5 %



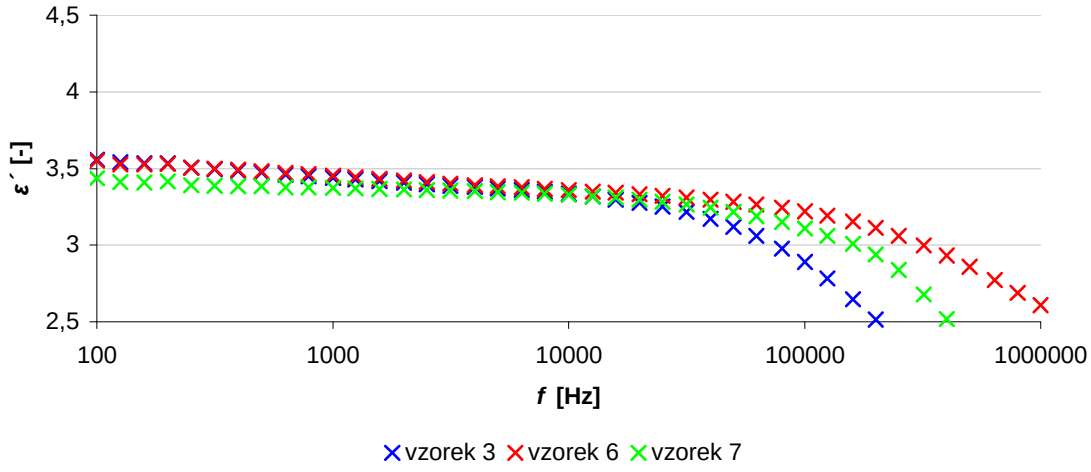
Obr. 5: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 33 %



Obr. 6: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 55 %



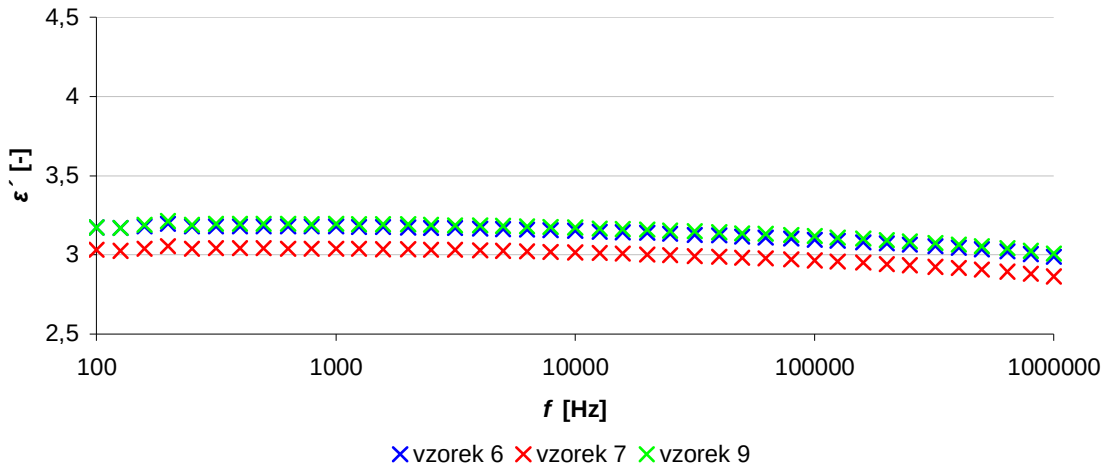
Obr. 7: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 75 %



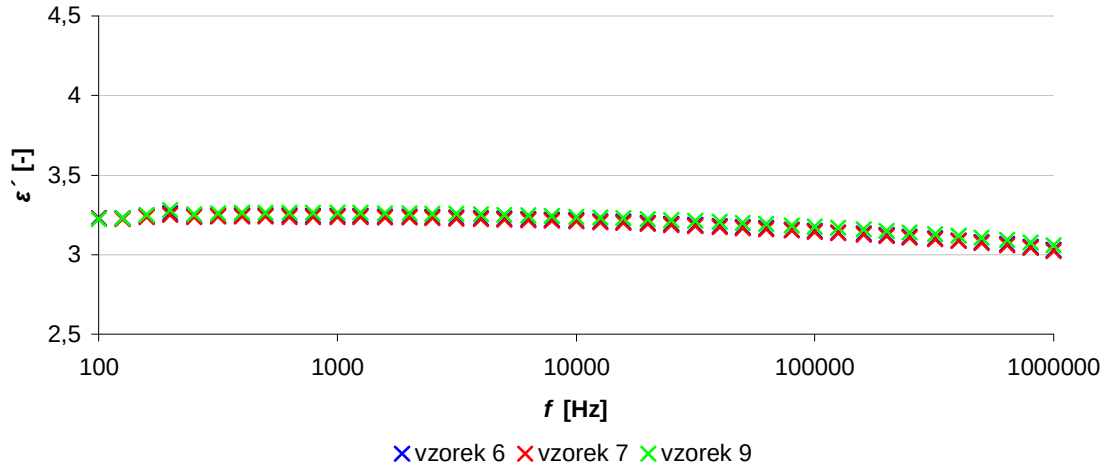
Obr. 8: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 93 %

2.7.2 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak se 4 % plněním slídou

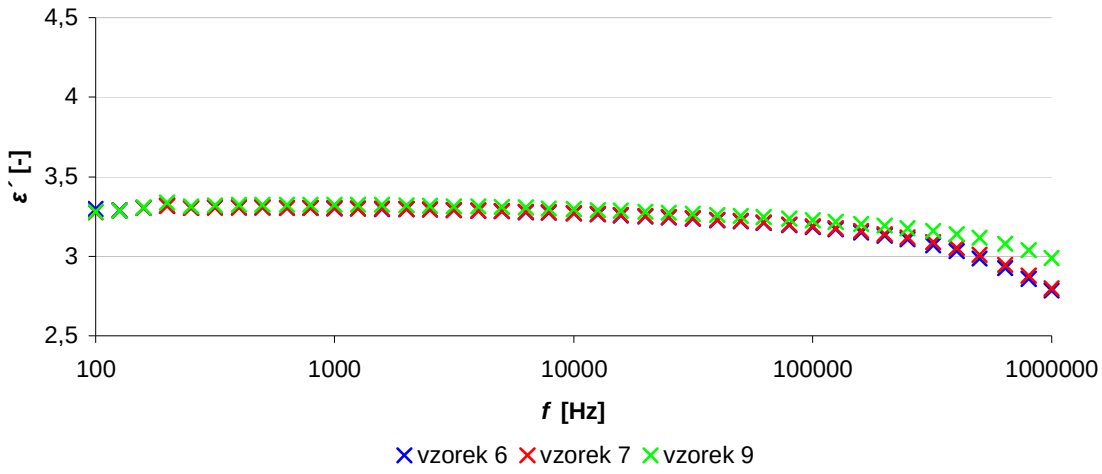
Jedná se o vzorky vytvrzeného laku se 4% plněním mikromletou slídou. Pro přehlednost byly vybrány tři vzorky, jejichž dielektrické vlastnosti a jejich změna si byly během procesu navlhání nejvíce podobné. Relativní permitivita, jak je patrné z obrázků 9 až 13, během zvyšující se vlhkosti rovněž stoupala. U vysušených lakových vzorků je relativní permitivita při výchozí frekvenci 100 Hz blízká hodnotě 3,2 (o 0,2 vyšší než u lakových vzorků bez slídy) a s frekvencí opět mírně klesá. Se zvyšující se vlhkostí vykazuje relativní permitivita od hodnoty frekvence přibližně 100 kHz strmější pokles. Při relativní vlhkosti 93 % vzrostla relativní permitivita až k hodnotě 4, ale jak je vidět na obrázku 13, s frekvencí klesala rychleji než u nižších vlhkostí.



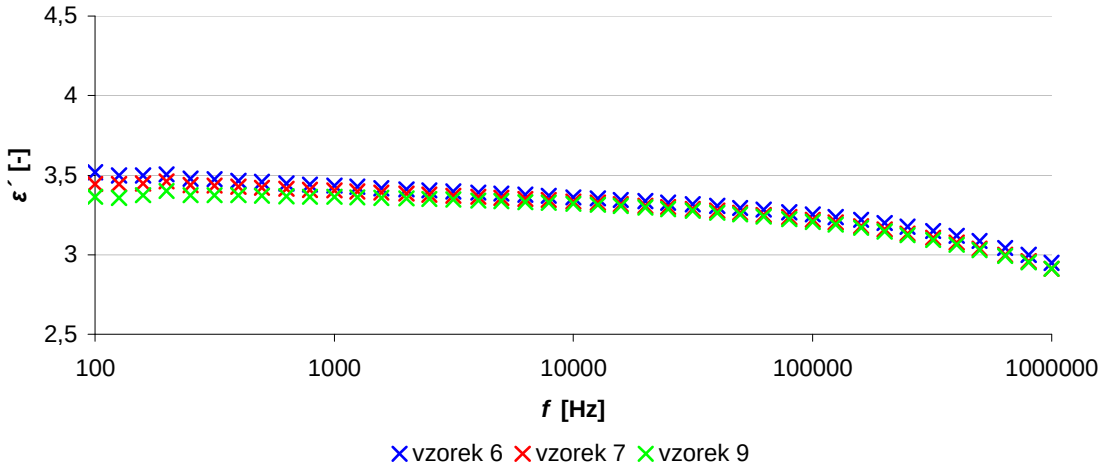
Obr. 9: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 5 %



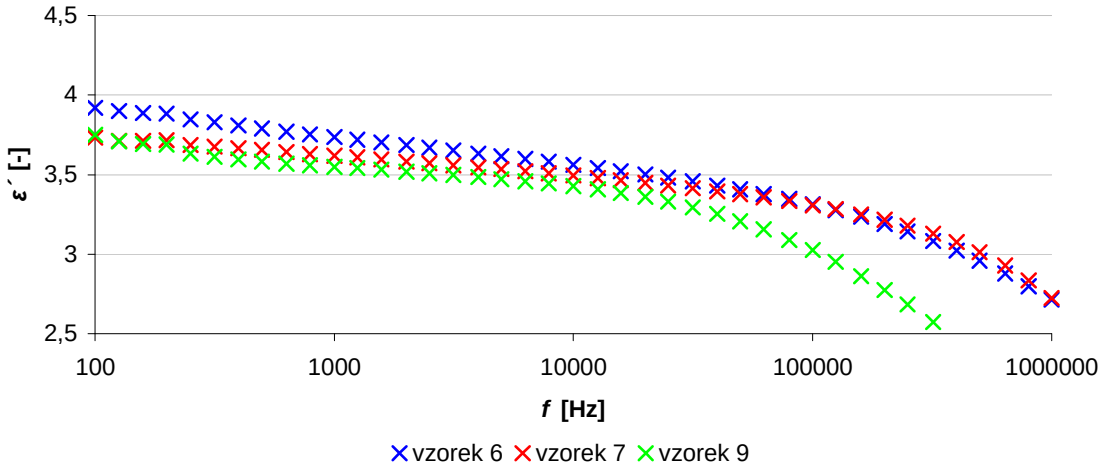
Obr. 10: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 33 %



Obr. 11: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 55 %



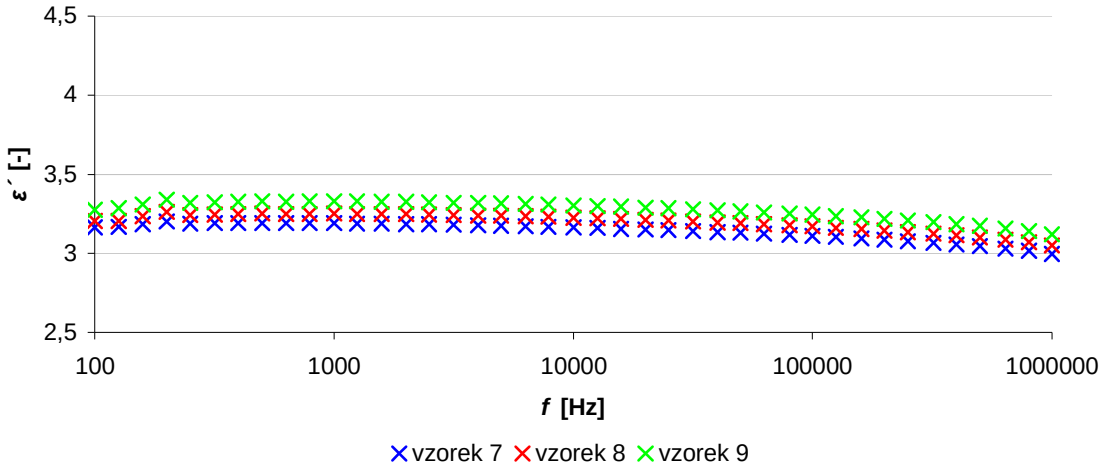
Obr. 12: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 75 %



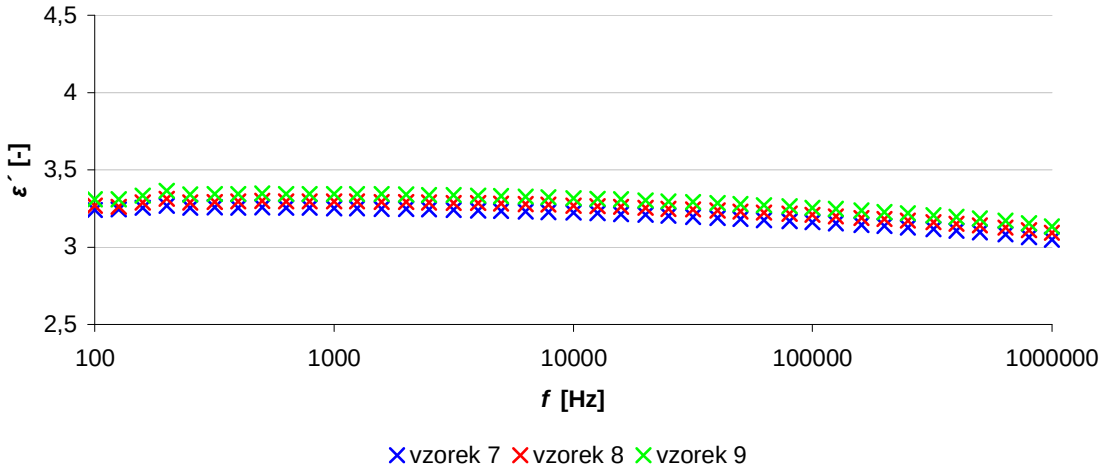
Obr. 13: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 93 %

2.7.3 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak s 8 % plněním slídou

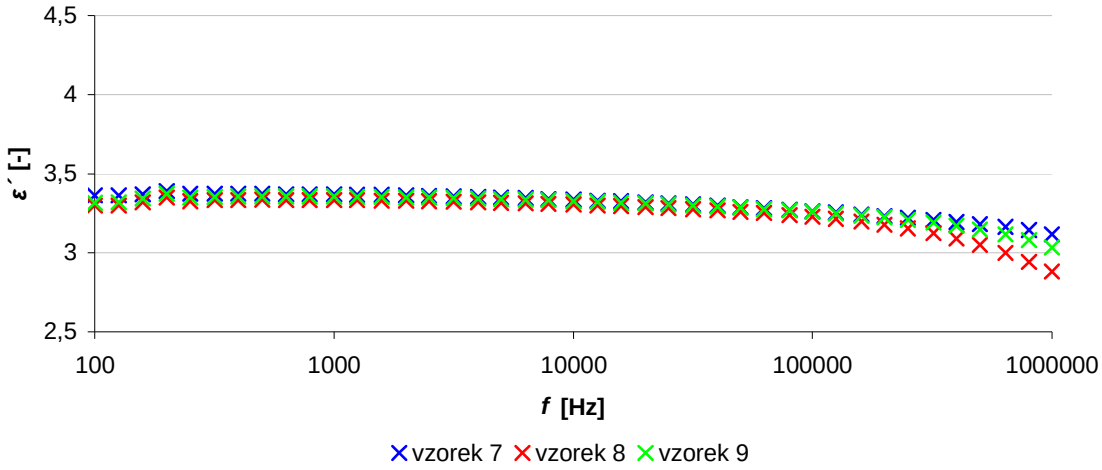
Jedná se o vzorky vytvrzeného laku s 8% plněním mikromletou slídou. Pro přehlednost byly vybrány tři vzorky, jejichž dielektrické vlastnosti a jejich změna si byly během procesu navlhání nejvíce podobné. Relativní permitivita, jak je patrné z obrázků 14 až 18, během zvyšující se vlhkosti rovněž stoupala. U vysušených lakových vzorků je relativní permitivita při výchozí frekvenci 100 Hz blízká hodnotě 3,25 (o 0,25 vyšší než u lakových vzorků bez slídy) a s frekvencí opět mírně klesá. Se zvyšující se vlhkostí vykazuje relativní permitivita od hodnoty frekvence přibližně 100 kHz strmější pokles. Při relativní vlhkosti 93 % vzorek 7 vykázal při frekvenci 100 Hz oproti ostatním vzorkům odchylku relativní permitivity od ostatních vzorků.



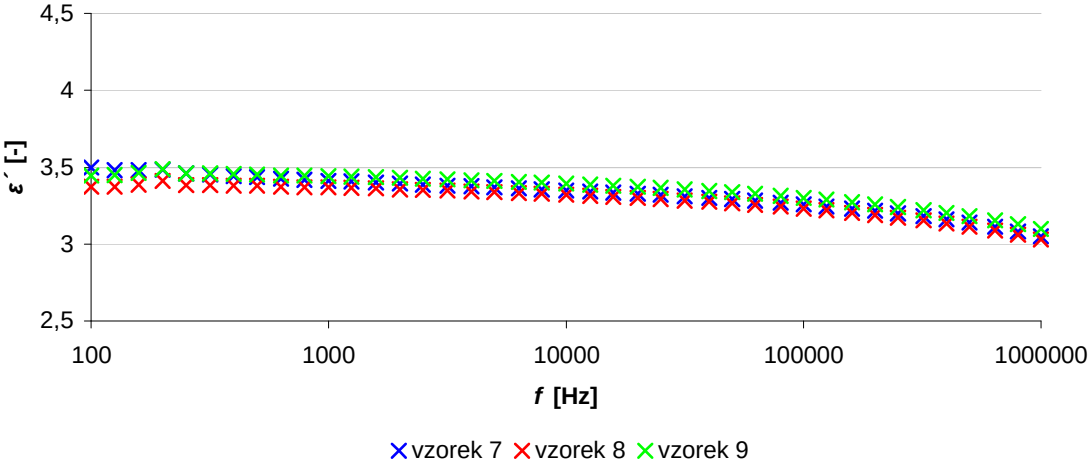
Obr. 14: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 5 %



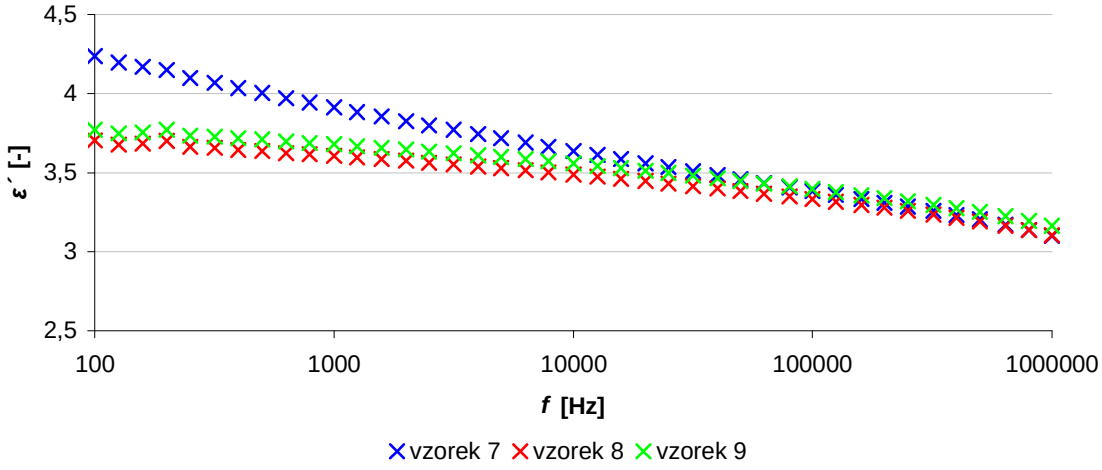
Obr. 15: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 33 %



Obr. 16: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 55 %



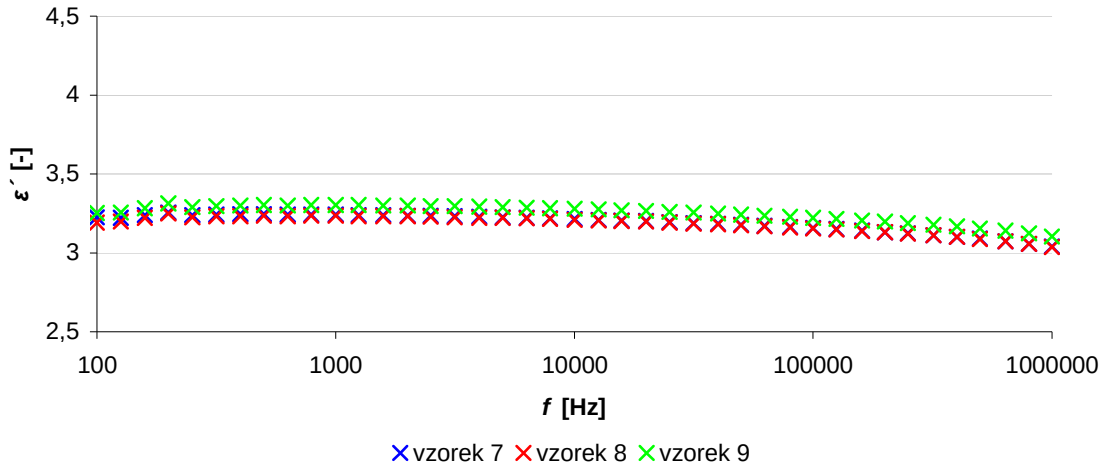
Obr. 17: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 75 %



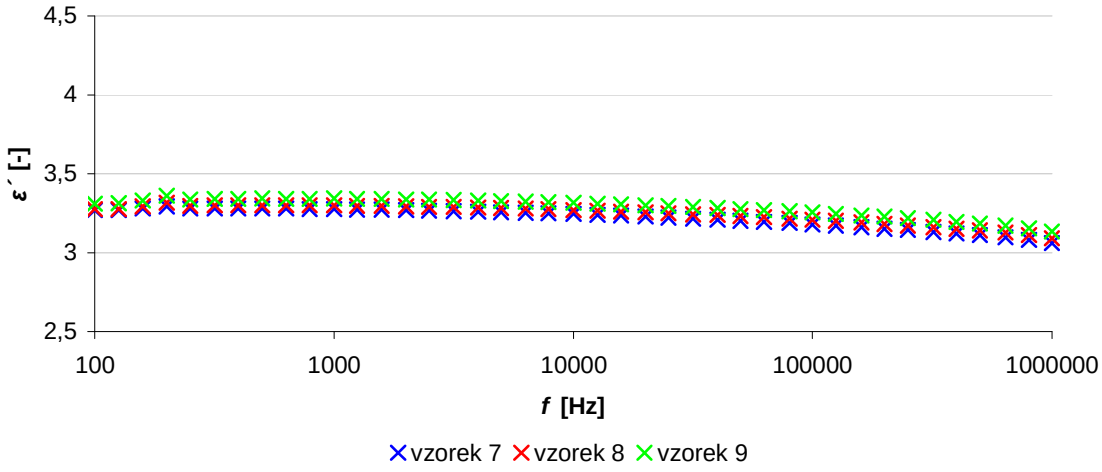
Obr. 18: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 93 %

2.7.4 Relativní permitivita při různých vlhkostech – lak s 12 % plněním slídou

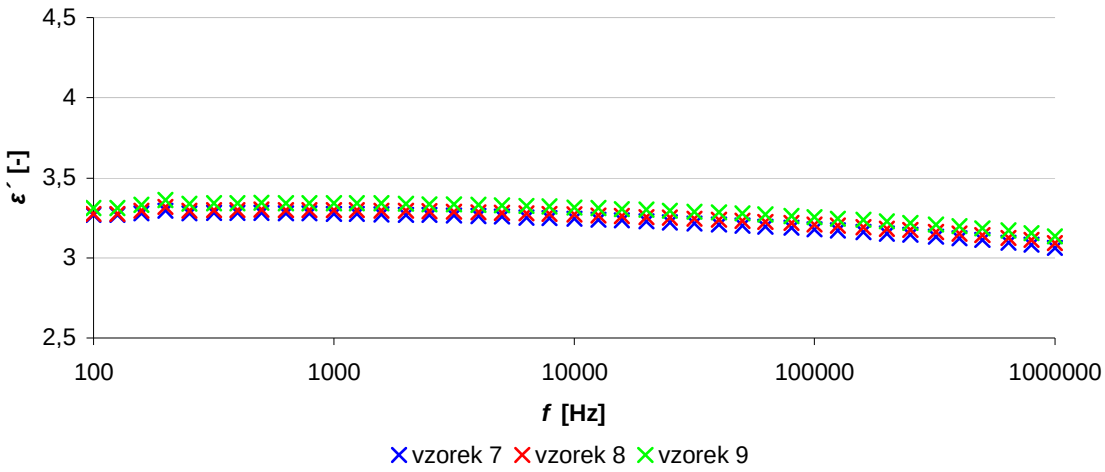
Jedná se o vzorky vytvrzeného laku s 12% plněním mikromletou slídou. Pro přehlednost byly vybrány tři vzorky, jejichž dielektrické vlastnosti a jejich změna si byly během procesu navlhání nejvíce podobné. Relativní permitivita, jak je patrné z obrázků 19 až 23, během zvyšující se vlhkosti rovněž stoupala. U vysušených lakových vzorků je relativní permitivita při výchozí frekvenci 100Hz blízká hodnotě 3,25 (o 0,25 vyšší než u lakových vzorků bez slídy, tedy stejná jako u vzorků s 8 % plněním) a s frekvencí opět mírně klesá. Se zvyšující se vlhkostí vykazuje relativní permitivita od hodnoty frekvence přibližně 100 kHz strmější pokles. Při relativní vlhkosti 93 % vzorek 7 vykázal při frekvenci 100 Hz oproti ostatním vzorkům odchylku relativní permitivity od ostatních vzorků.



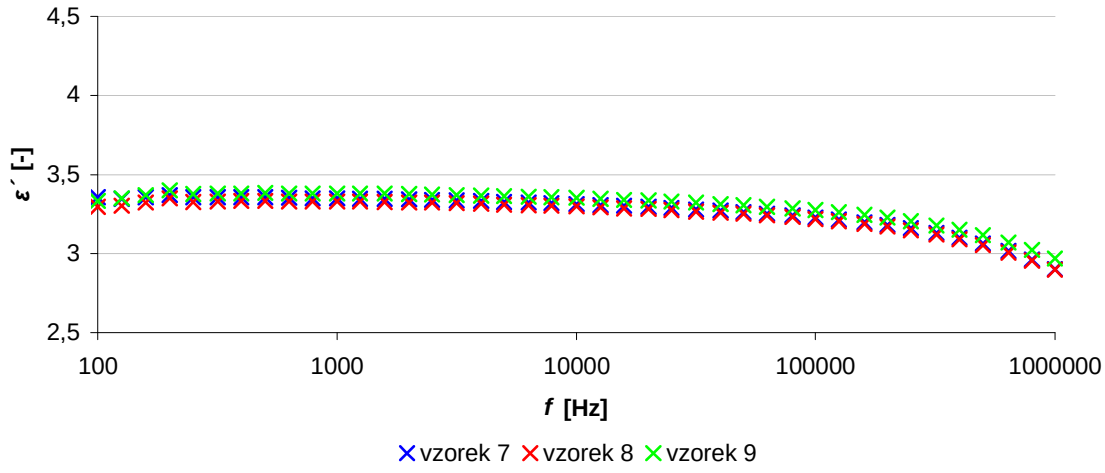
Obr. 19: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 5 %



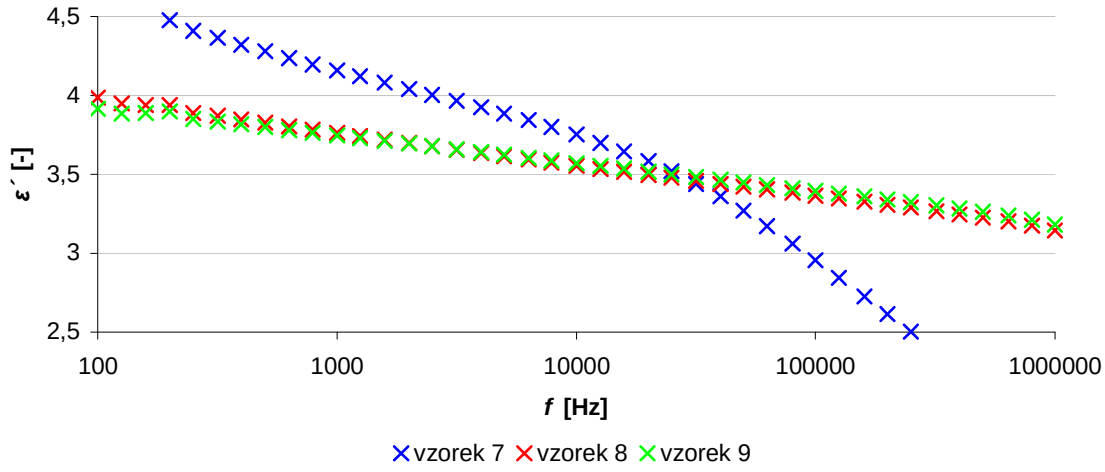
Obr. 20: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 33 %



Obr. 21: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 55 %



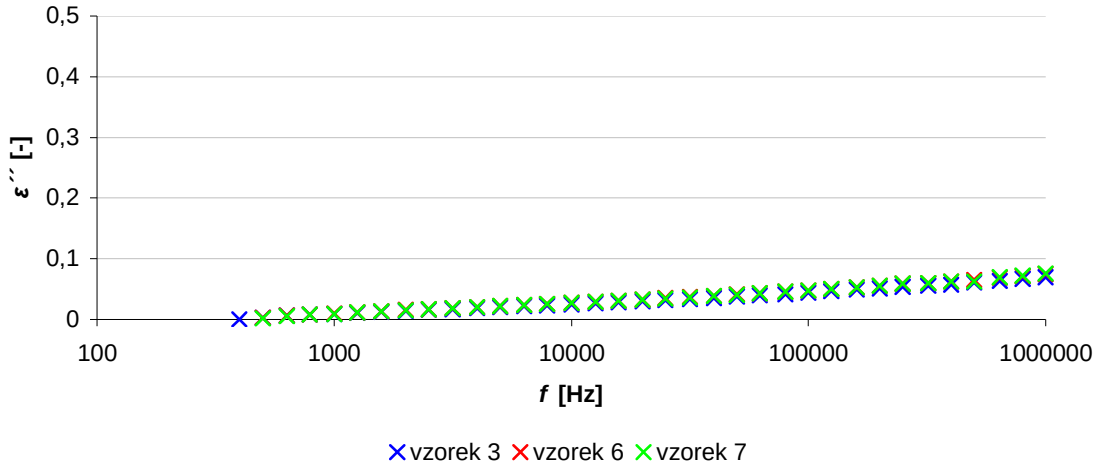
Obr. 22: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 75 %



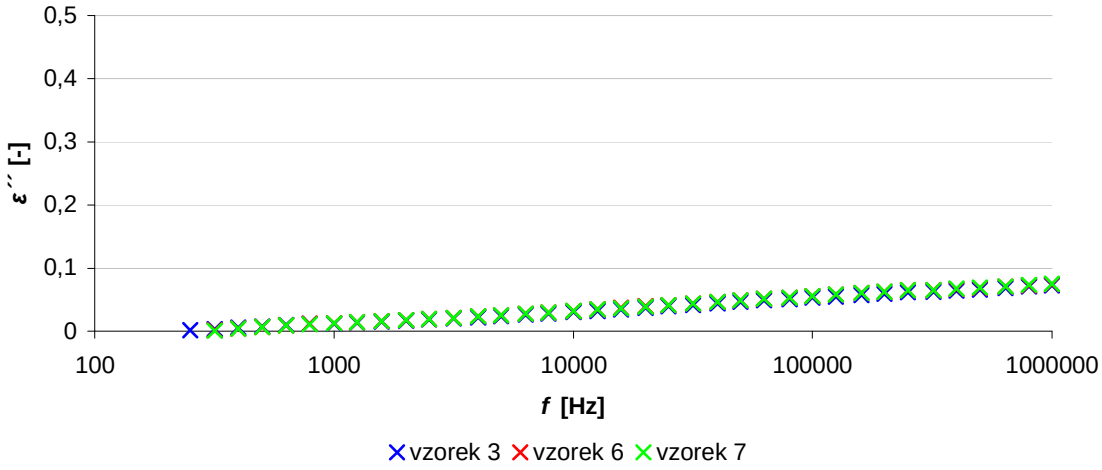
Obr. 23: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 93 %

2.7.5 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak bez plnění slídou

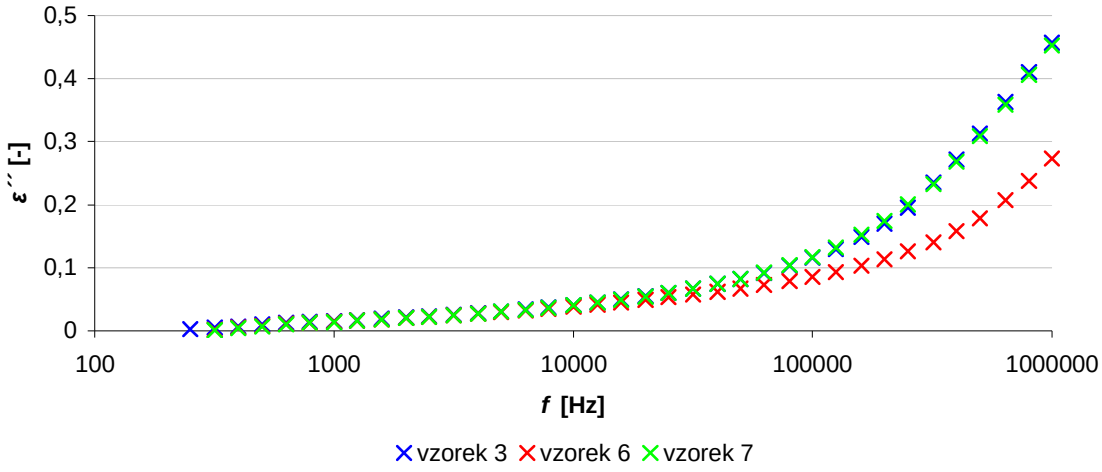
Ztrátové číslo u čistých lakových vzorků bez slídy bylo kolem frekvence 100 Hz zanedbatelné. Jedná se vždy o stejné tři vzorky u kterých jsou na předešlých stranách uvedeny závislosti relativní permitivity. Ztráty se začaly projevovat až přibližně od hodnoty 1 kHz při působení všech vlhkostí kromě 93 %, kde bylo naměřeno při 100 Hz ztrátové číslo 0,1.



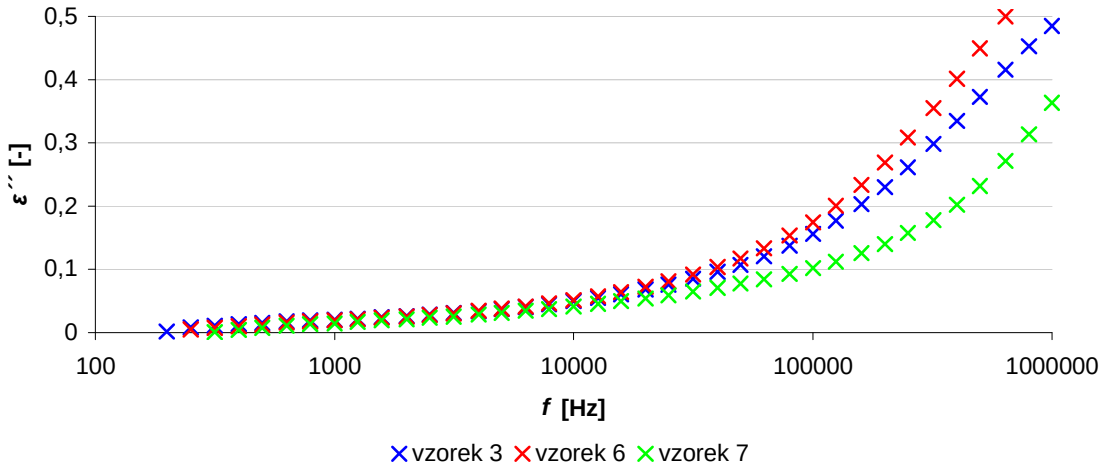
Obr. 24: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 5 %



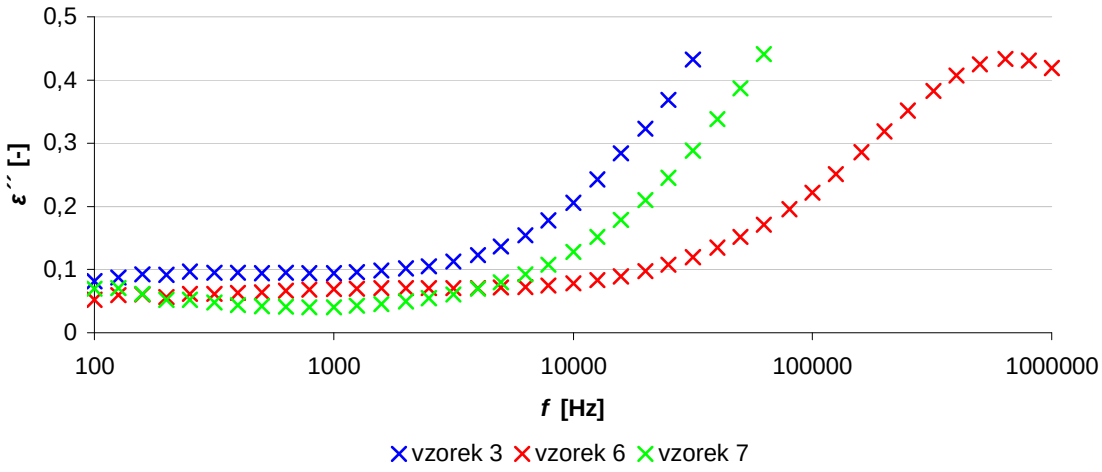
Obr. 25: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 33 %



Obr. 26: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 55 %



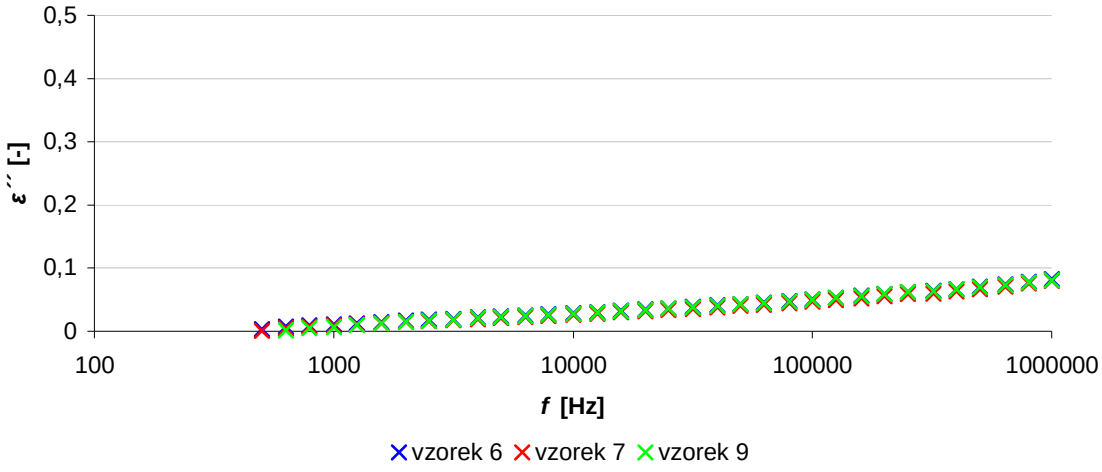
Obr. 27: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 75 %



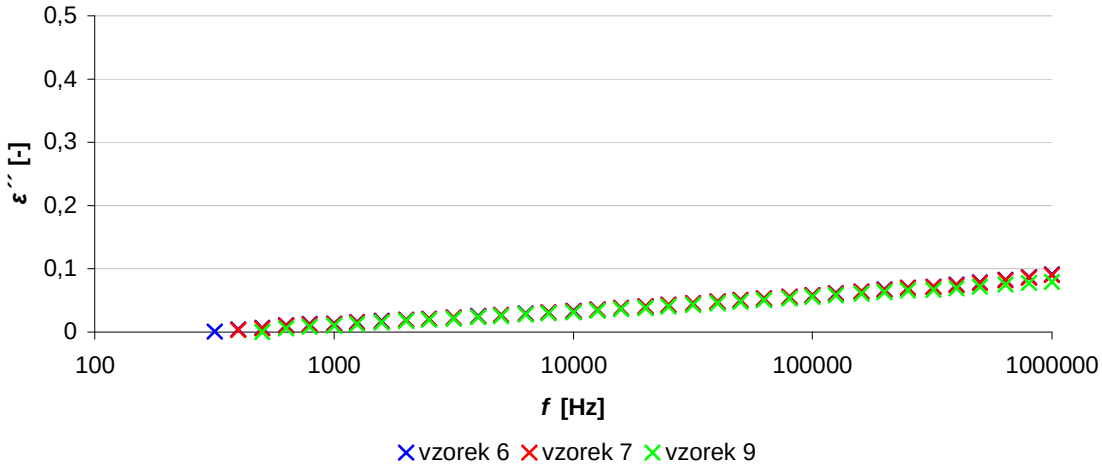
Obr. 28: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 93 %

2.7.6 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak se 4 % plněním slídou

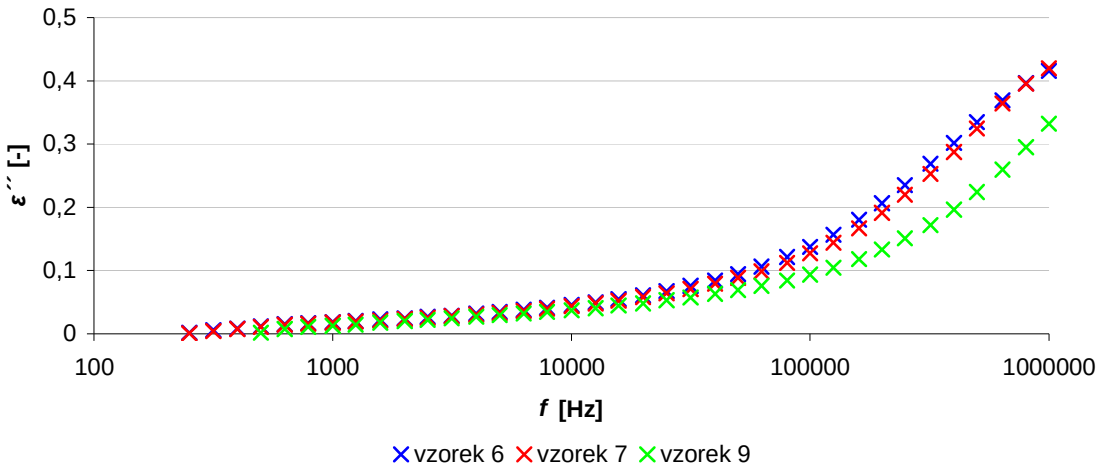
Ztrátové číslo u lakových vzorků plněných 4 % mikromleté slídy bylo kolem frekvence 100 Hz zanedbatelné. Ztráty se začaly projevovat až přibližně od hodnoty 1 kHz pro vlhkosti 5, 33 a 55 %. Při vlhkosti 75 % byly ztráty patrné již od 100 Hz a při 93 % vlhkosti měli hodnotu 0,1 na frekvenci 100 Hz.



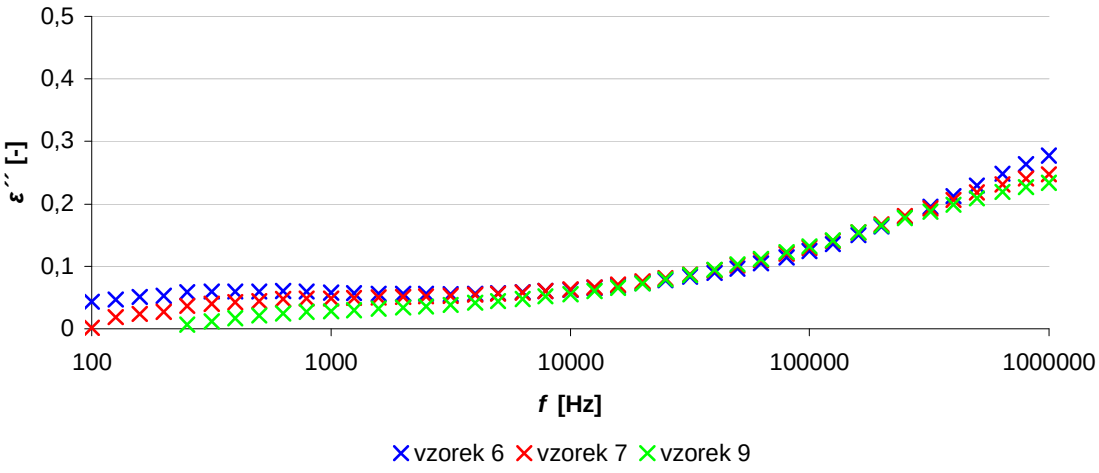
Obr. 29: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 5 %



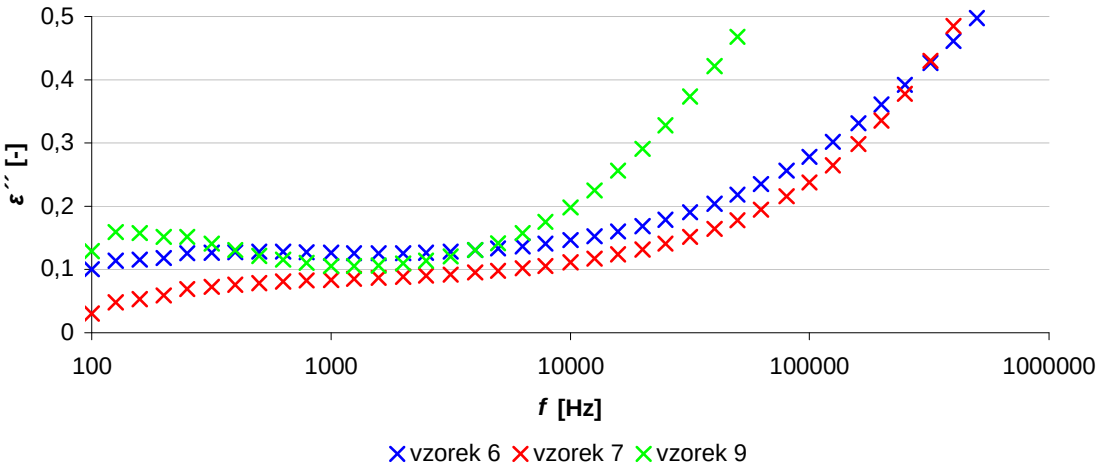
Obr. 30: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 33 %



Obr. 31: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 55 %



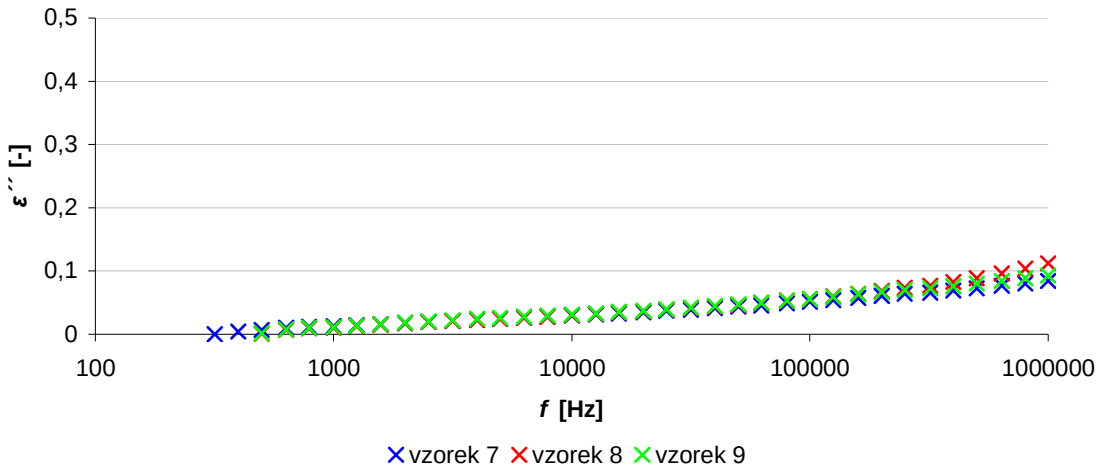
Obr. 32: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 75 %



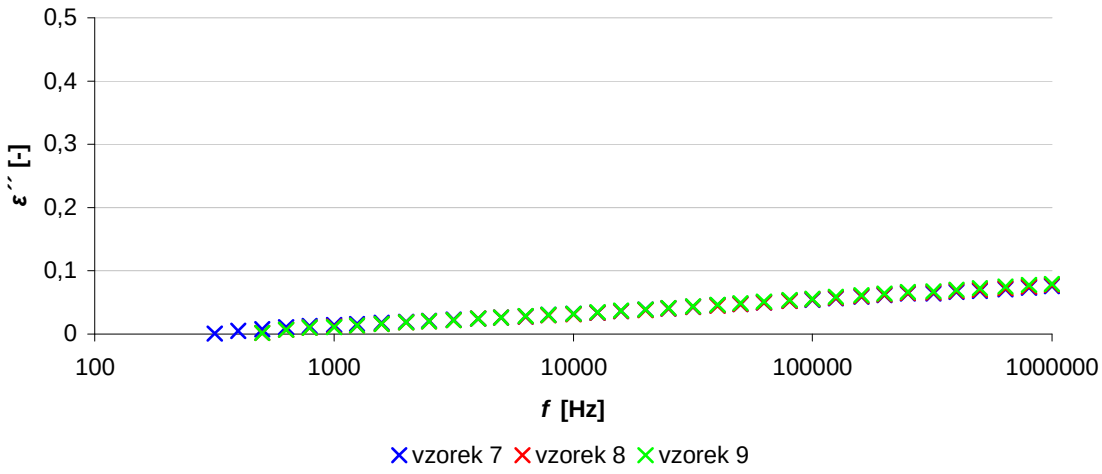
Obr. 33: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 93 %

2.7.7 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak s 8 % plněním slídou

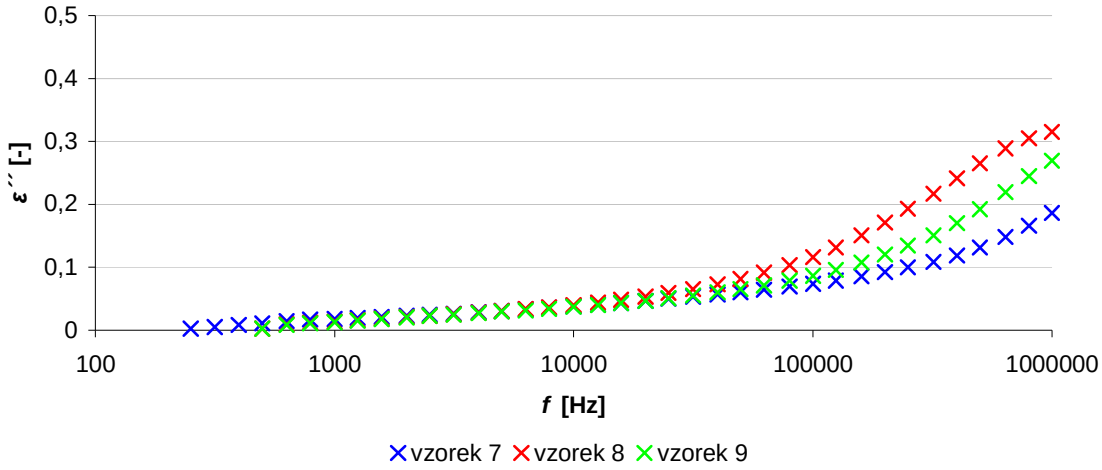
Ztrátové číslo u lakových vzorků plněných 8 % mikromleté slídy mělo při navlhání podobný průběh, jako u lakových vzorků se 4% plněním. Vzorek 7 měl ale při vlhkostech 75 a 93 % odlišný průběh oproti vzorkům 8 a 9, jeho ztrátové číslo je na 100 Hz o 0,2 vyšší a postupně se aproximuje k průběhům ostatních vzorků.



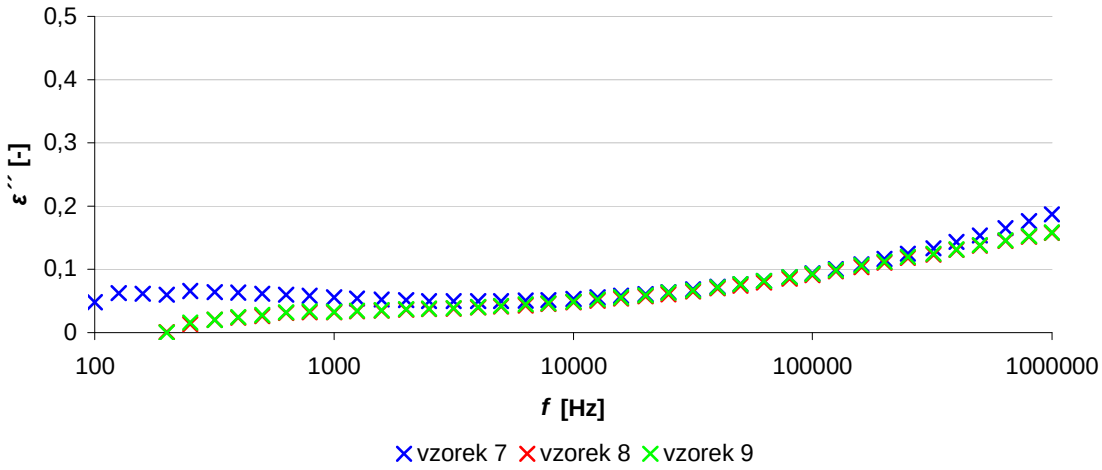
Obr. 34: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 5 %



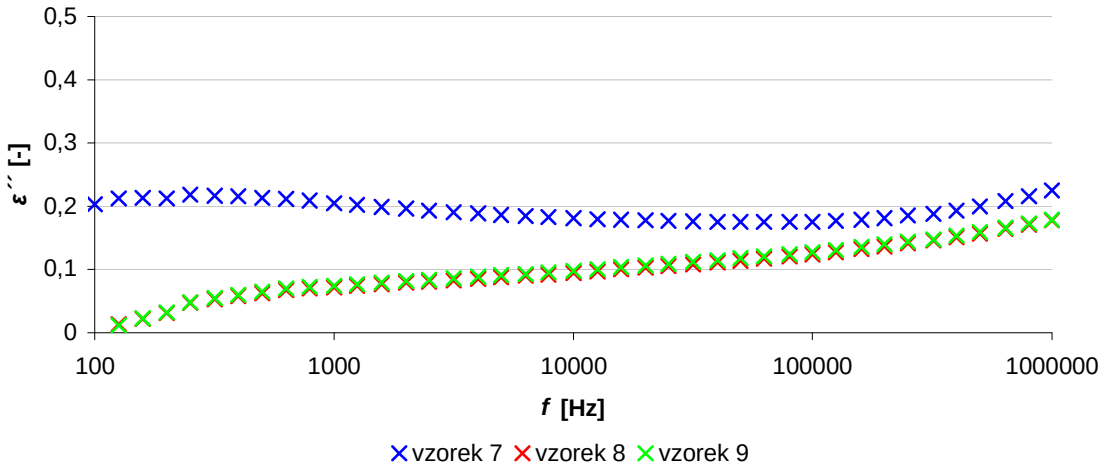
Obr. 35: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 33 %



Obr. 36: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 55 %



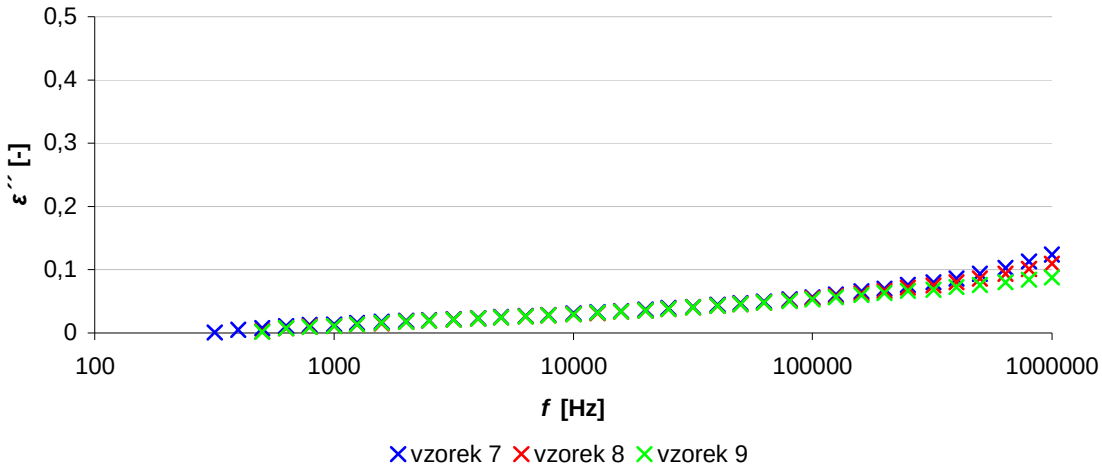
Obr. 37: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 75 %



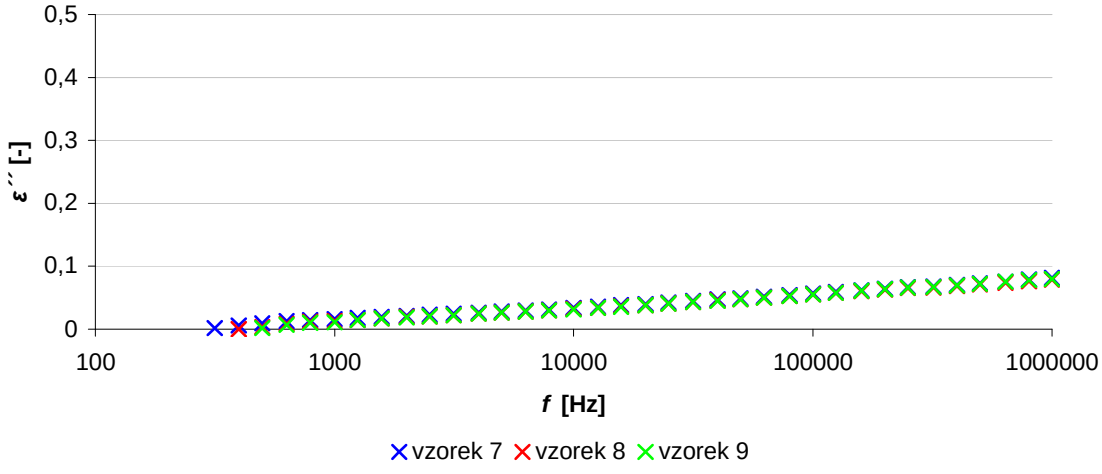
Obr. 38: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 93 %

2.7.8 Ztrátové číslo při různých vlhkostech – lak s 12 % plněním slídou

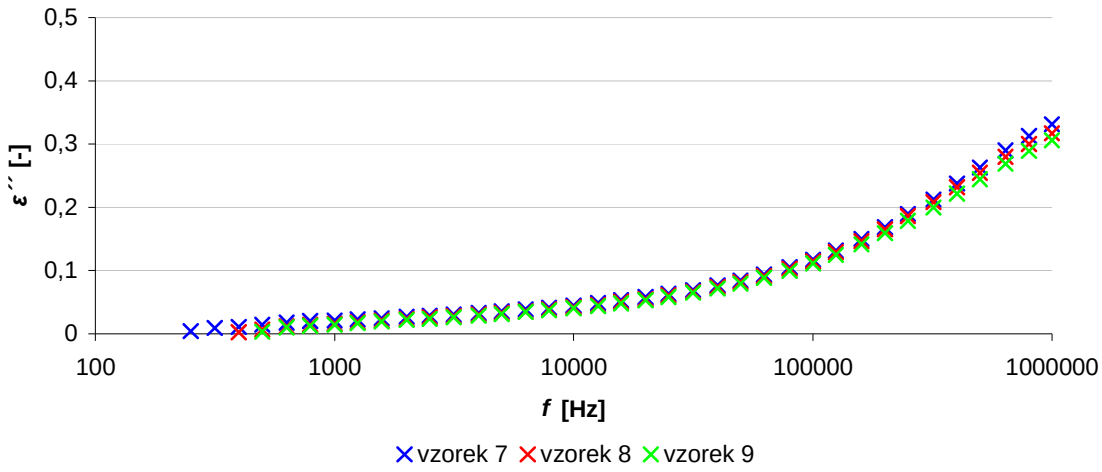
Ztrátové číslo u lakových vzorků plněných 12 % mikromleté slídy mělo při vlhkostech 5 a 33 % podobný průběh jako u vzorků s 8% plněním. Při vlhkosti 55 % jsou ztráty při nízkých frekvencích taktéž zanedbatelné, ale při frekvenci 1 MHz vzrostly až k hodnotě 0,3. Naproti tomu při vlhkosti 75 % je hodnota ztrát při 1 MHz přibližně 0,1, ale ztráty jsou patrné již od 100 Hz. U 93% vlhkosti jsou ztráty opět nejvyšší a vzorek 7 vykazuje odlišný průběh.



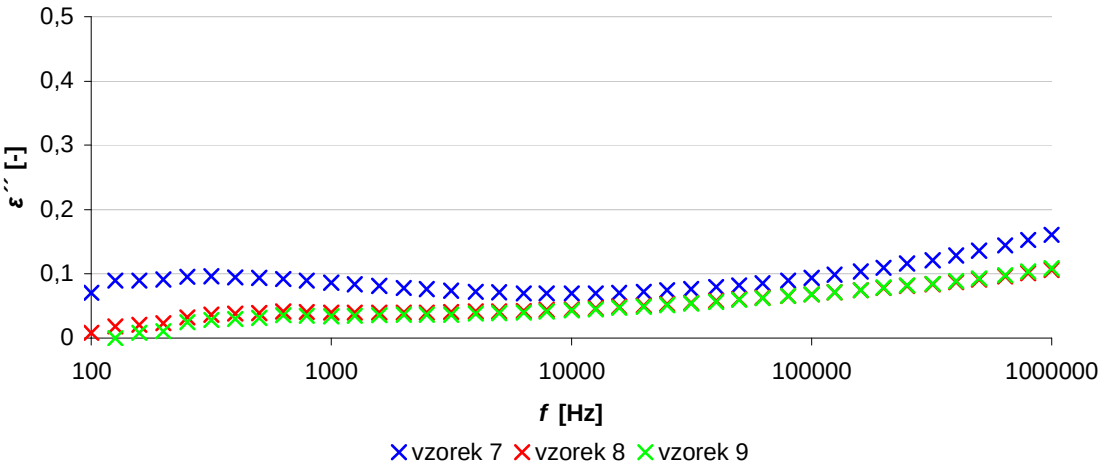
Obr. 39: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 5 %



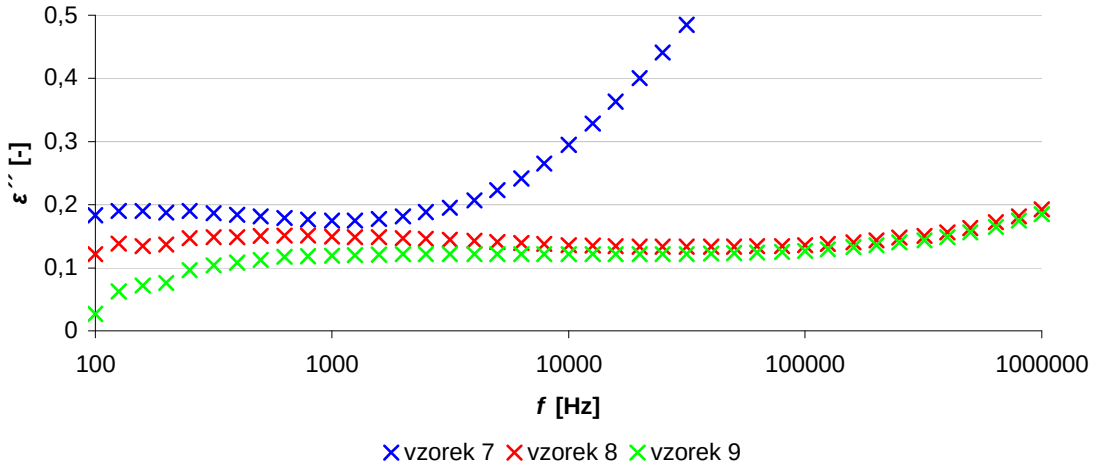
Obr. 40: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 33 %



Obr. 41: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 55 %

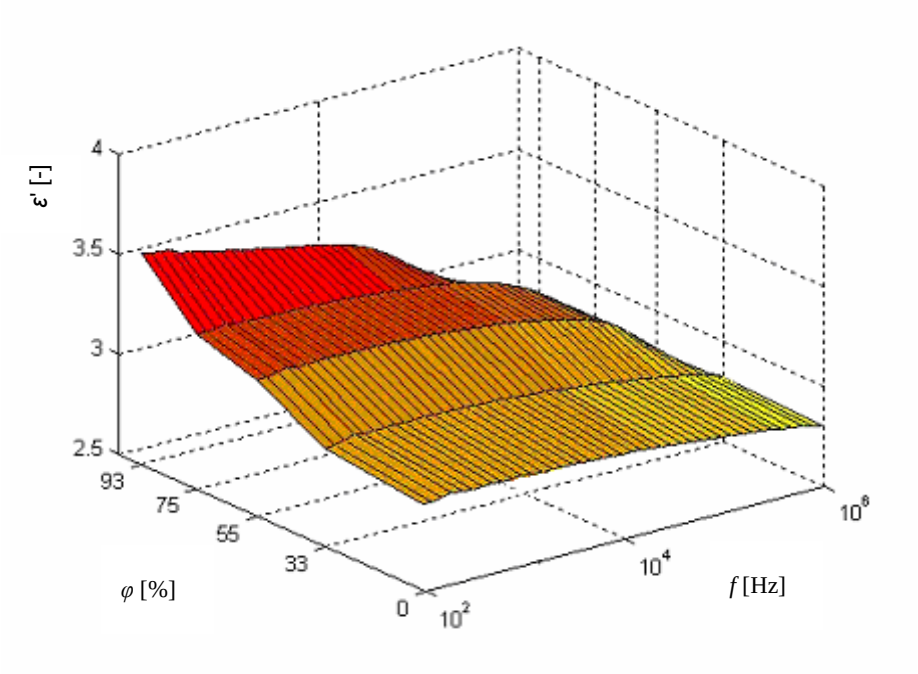


Obr. 42: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 75 %

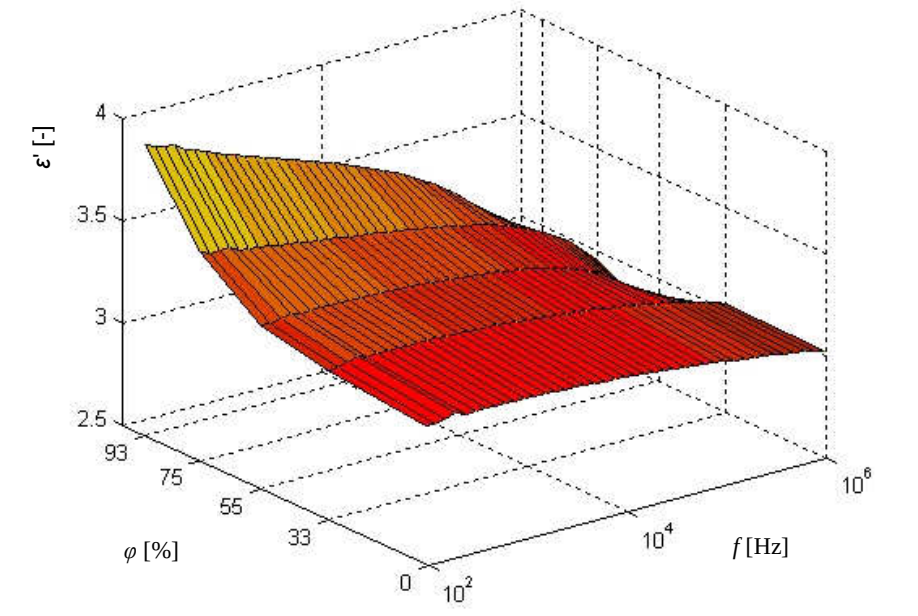


Obr. 43: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 93 %

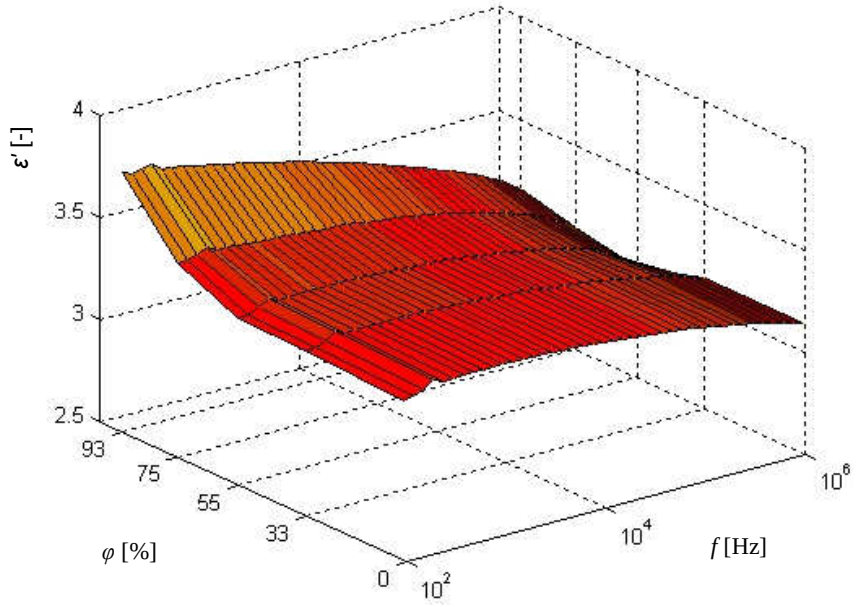
2.7.9 3D zobrazení frekvenční závislosti relativní permitivity na zvyšující se vlhkosti



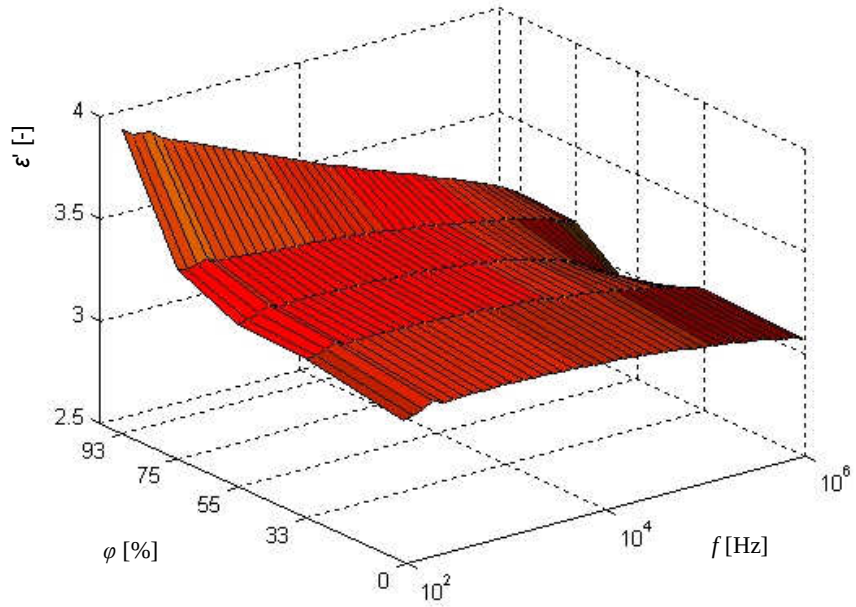
Obr. 44: Frekvenční závislost relativní permitivity vzorku 3 (bez slídy) při změnách relativní vlhkosti



Obr. 45: Frekvenční závislost relativní permitivity vzorku 6 (4 % slídy) při změnách relativní vlhkosti

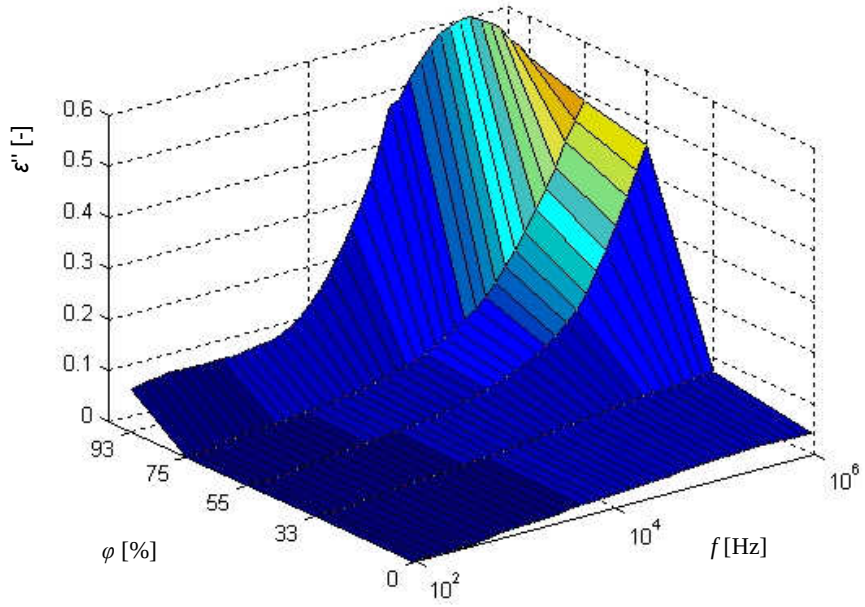


Obr. 46: Frekvenční závislost relativní permitivity vzorku 9 (8 % slídy) při změnách relativní vlhkosti

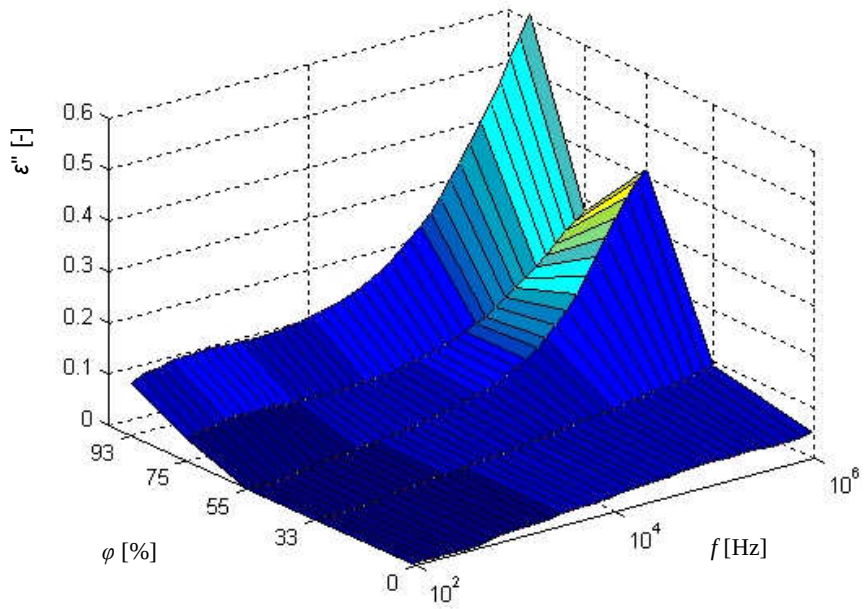


Obr. 47: Frekvenční závislost relativní permitivity vzorku 8 (12 % slídy) při změnách relativní vlhkosti

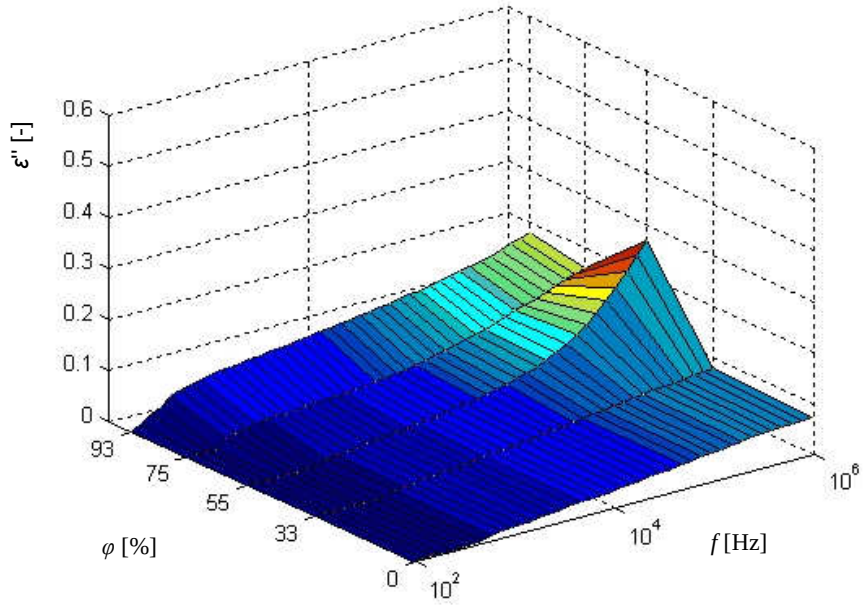
2.7.10 3D zobrazení frekvenční závislosti ztrátového čísla na zvyšující se vlhkosti



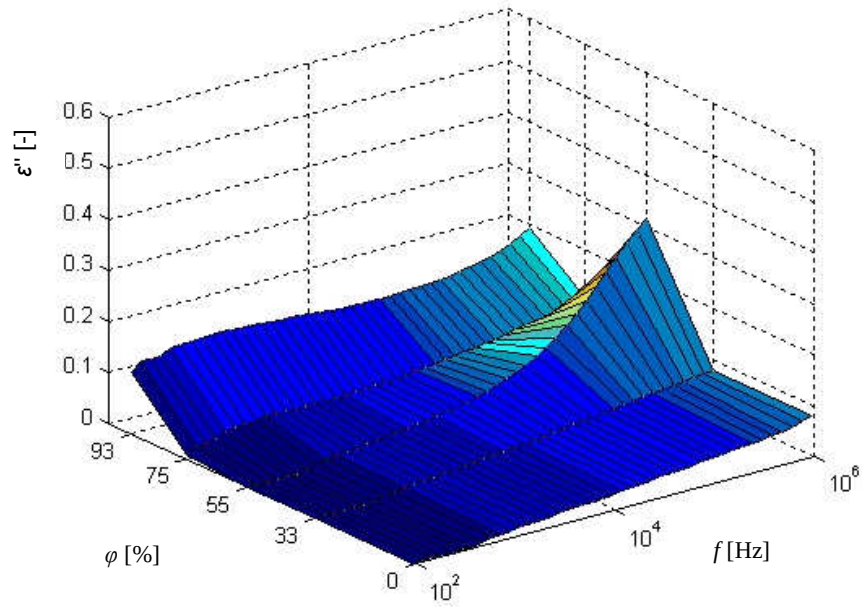
Obr. 48: Frekvenční závislost ztrátového čísla vzorku 3 (bez slídy) při změnách relativní vlhkosti



Obr. 49: Frekvenční závislost ztrátového čísla vzorku 6 (4 % slídy) při změnách relativní vlhkosti



Obr. 50: Frekvenční závislost ztrátového čísla vzorku 9 (8 % slídy) při změnách relativní vlhkosti



Obr. 51: Frekvenční závislost ztrátového čísla vzorku 8 (12 % slídy) při změnách relativní vlhkosti

3 Závěr

Základním cílem práce, který se podařilo splnit, bylo zjistit vliv navlhání na dielektrické vlastnosti epoxidového laku TSA 220S s různými hmotnostními procenty slídy.

Relativní permitivita vysušeného lakového vzorku bez slídy se pohybovala blízko hodnoty 3. Při zvyšování hodnoty relativní vlhkosti prostředí relativní permitivita vzrůstala a s frekvencí mírně klesala, na frekvenci 1 MHz přibližně o 0,25. Nejvyšší hodnoty (3,5) u vzorků bez slídy, dosáhla při relativní vlhkosti 93 % při frekvenci 100 Hz. Poté klesala strměji a na frekvencích od 100 kHz ještě do nižších hodnot oproti průběhům při všech nižších vlhkostech. Přidaná slída měla za důsledek pouze zvýšení relativní permitivity v řádu desetin, tendence průběhu během navlhání zůstala zachována.

Ztrátové číslo, bez ohledu na procento plnění slídou, ve frekvenčním pásmu od 100 Hz do 1 MHz pro vliv 5% a 33% relativní vlhkosti mírně stoupalo, vždy maximálně do hodnoty 0,1. Do frekvence přibližně 300 Hz jsou ztráty zcela zanedbatelné. Při působení prostředí o relativní vlhkosti 55 % se ztráty na nižších frekvencí projevovaly podobně jako u vlhkosti 5 % a 33 %. Od frekvencí 100 kHz ale zaznamenáváme prudší zvyšování ztrát, u některých vzorků je již patrné relaxační maximum. U vlhkostí 75 % a 93 % jsou ztráty patrné již od frekvence 100 Hz a při vyšších frekvencích rostou až k hodnotám 0,8.

Měření bylo zatíženo chybou, způsobenou nedokonale rovným povrchem vzorků. Projevila se tedy vzduchová mezera, která snížila výslednou kapacitu. Pro eliminování dalších chyb, především vysychání navlhlých vzorků během měření, probíhalo vkládání do elektrodového systému co nejrychleji. Jelikož také nemůžeme zaručit přesné rozložení slídy ve vzorku, byly při každém měření vkládány do elektrodového systému stejně natočené.

Jako ověření naměřených hodnot by bylo vhodné opakovat měření na stejném principu, pouze navlhání vzorků by neprobíhalo postupně (jako v případě této práce), ale pro každou změnu vlhkosti by se volily nové vzorky, před expozicí v prostředí o relativní vlhkosti, řádně vysušené.

4 Použitá literatura

[1] JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M., *Materiály a technická dokumentace, část Materiály v elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 129 stran.

[2] KAZELLE, J., JIRÁK, J., VANĚK, J., LIEDERMANN K., ROZSÍVALOVÁ Z., SEDLAŘÍKOVÁ M., HAVLÍČEK, S.,*Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 273 stran.

[3] MENTLÍK, V., *Dielektrické prvky a systémy*. BEN – technická literatura, 2006. 240 stran.

[4] ENCYKLOPEDIE: Internetová encyklopedie WIKIPEDIA [online]. [cit.2007-12-26]. Dostupné z: <cs.wikipedia.org>.

[5] OA SVITAVY: Projekt RENATA: Slídy [online]. [cit.2007-12-26]. Dostupné z: http://www.oa.svitavy.cz/pro/renata/priroda/priroda1/nerosty/slida/index.htm.

[6] EMD - Chemicals Inc.: Slída Mica-A [online]. [cit.2007-12-26]. Dostupné z WWW: www.emdchemicals.com/rona/2404.asp.

[7] BMT – Brněnská Medicínská Technika, a.s.: STERICELL [online]. [cit.2007-12-26]. Dostupné z WWW: http://www.bmt.cz/.

[8] SÝKORA, R., *Úvod do vlhkosti plynů.* 2006. 32 stran.

[9] SIMULATION CENTER FOR FINE CERAMICS [online]. 2006 [cit. 2008-05-20]. Dostupný z WWW: http://sfc.kicet.re.kr/.

[10] KITMONDO [online]. 2005-2008 [cit. 2008-05-20]. Dostupný z WWW: http://www.kitmondo.com.

[11] ARCO technik s.r.o. [online]. 2000 [cit. 2008-05-20]. Dostupný z WWW: http://www.arco.cz/.

5 Přílohy

a) Vybrané grafy frekvenčních závislostí relativní permitivity a ztrátového čísla s upraveným měřítkem osy y. Lépe vystihují průběh při vyšších frekvencích.

b) Frekvenční závislosti relativní permitivity, parametr : relativní vlhkost

c) Frekvenční závislosti ztrátového čísla, parametr : relativní vlhkost

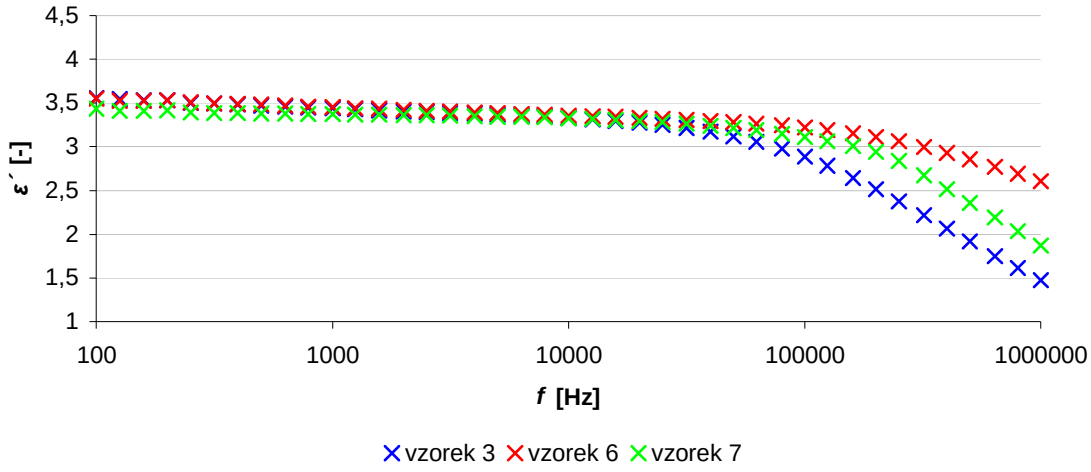
d) Frekvenční závislosti relativní permitivity, parametr : plnění slídou

e) Frekvenční závislosti ztrátového čísla, parametr : plnění slídou

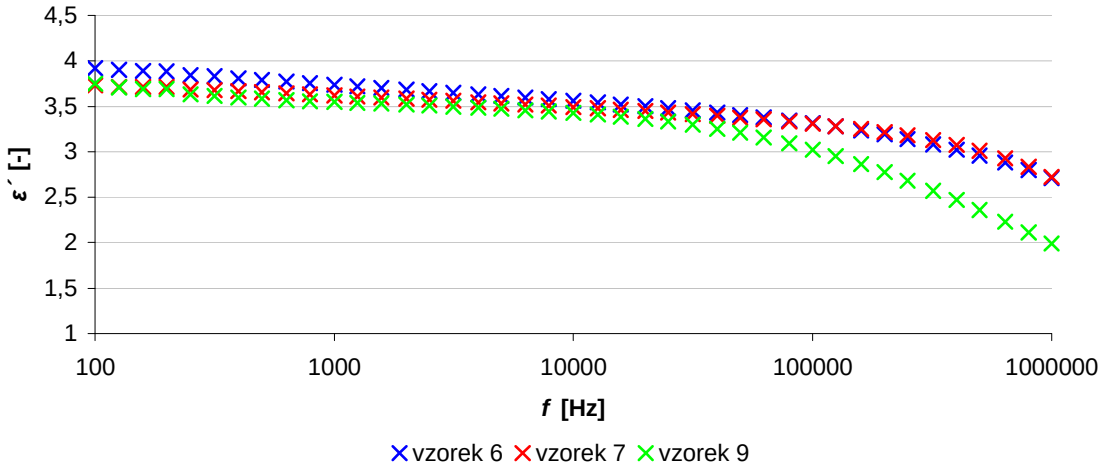
f) Relativní permitivita je funkcí hmotnostních procent slídy, parametr : frekvence

g) Ztrátové číslo je funkcí hmotnostních procent slídy, parametr : frekvence

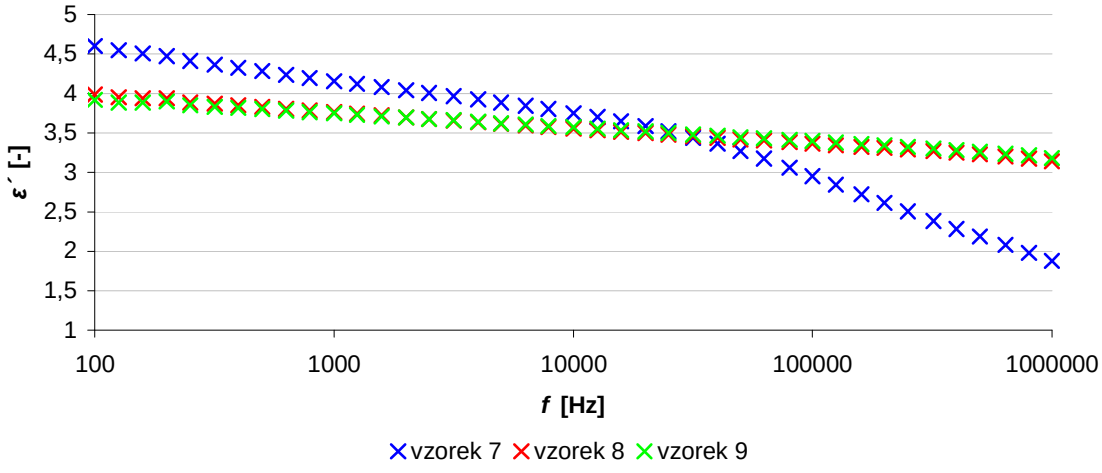
a) Vybrané grafy frekvenčních závislostí relativní permitivity a ztrátového čísla s upraveným měřítkem osy y.



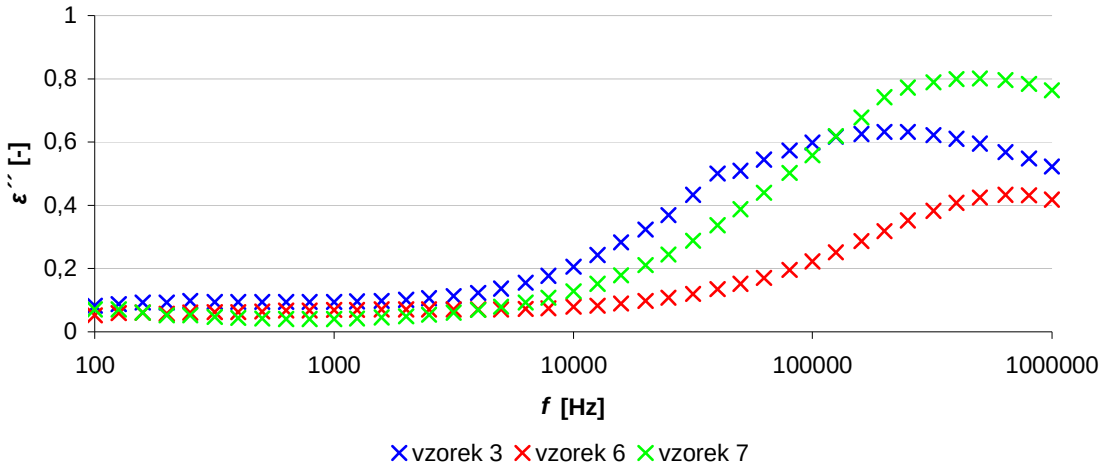
Obr. P1: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 93 %, vzorky bez slídy



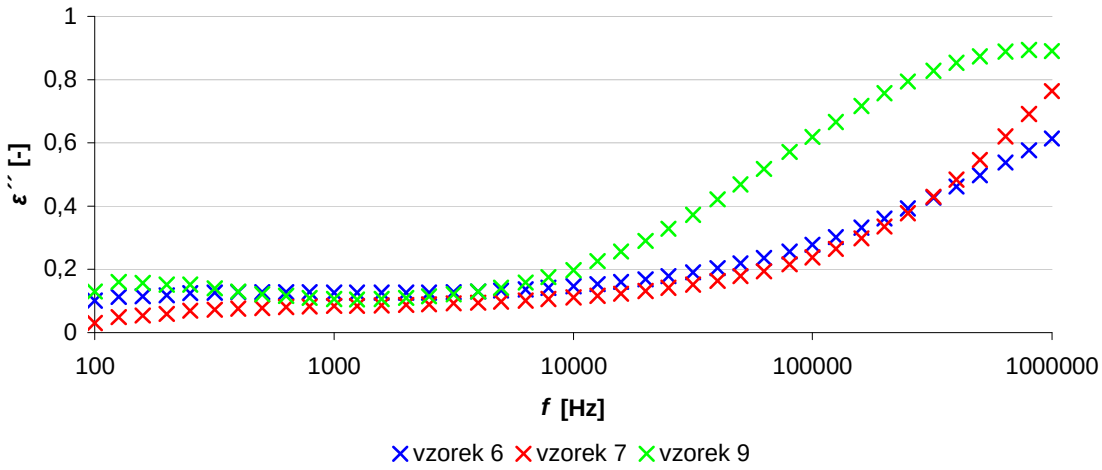
Obr. P2: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 93 %, 4 % slídy



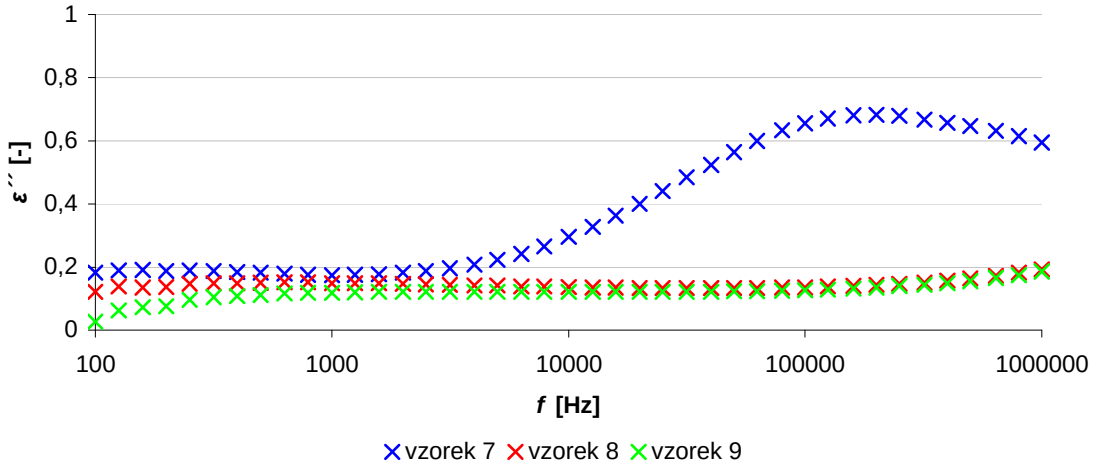
Obr. P3: Frekvenční závislost relativní permitivity při φ = 93 %, 12 % slídy



Obr. P4: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 93 %, vzorky bez slídy

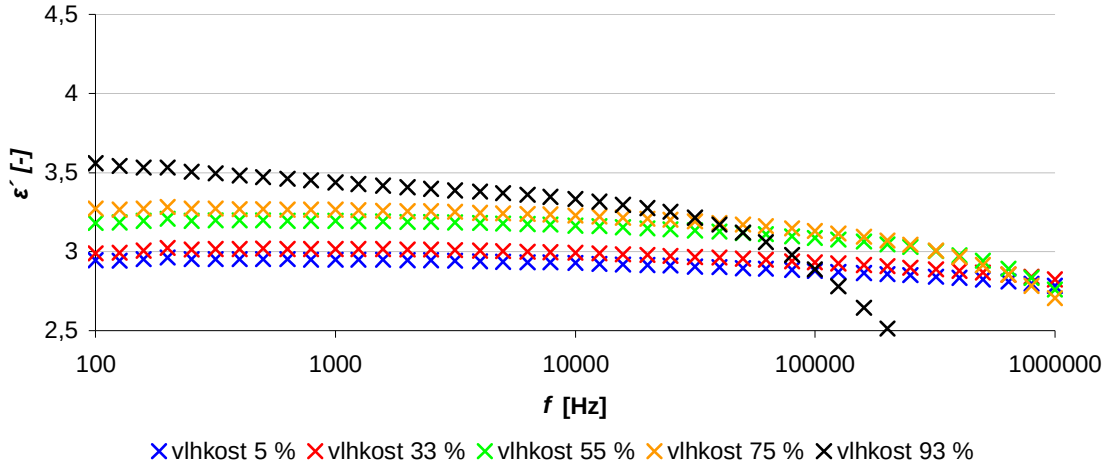


Obr. P5: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 93 %, 4 % slídy

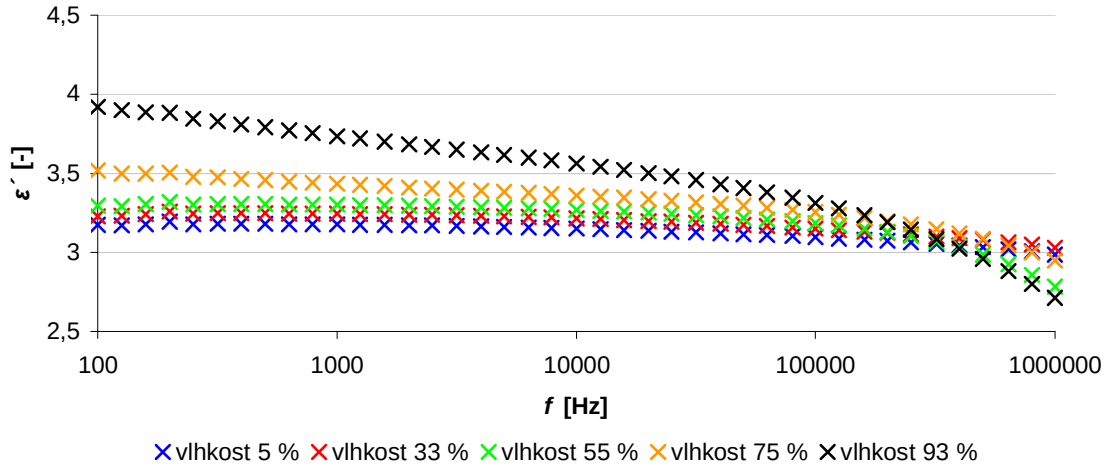


Obr. P6: Frekvenční závislost ztrátového čísla při φ = 93 %, 12 % slídy

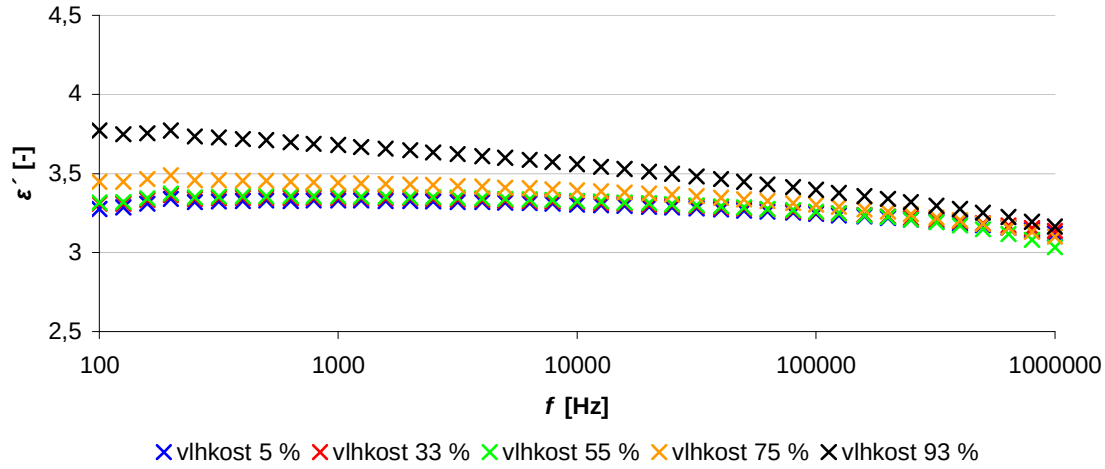
b) Frekvenční závislosti relativní permitivity, parametr : relativní vlhkost



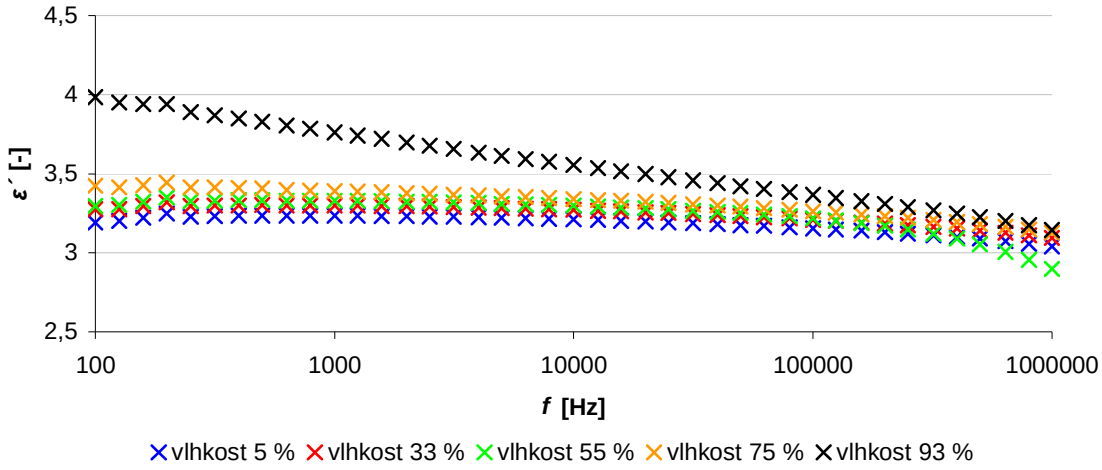
Obr. P7: Frekvenční závislost relativní permitivity pro všechny vlhkosti, vzorek 3 - bez slídy



Obr. P8: Frekvenční závislost relativní permitivity pro všechny vlhkosti, vzorek 6 – 4 % slídy

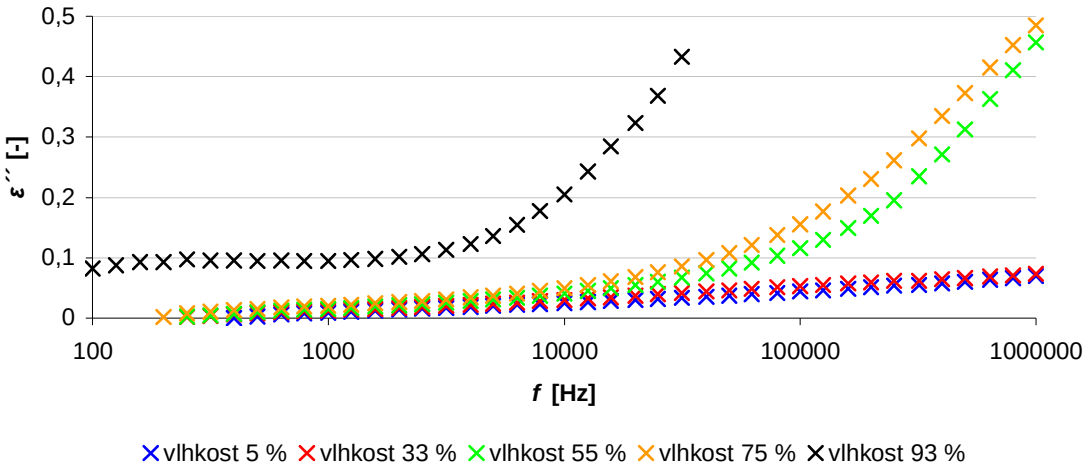


Obr. P9: Frekvenční závislost relativní permitivity pro všechny vlhkosti, vzorek 9 – 8 % slídy

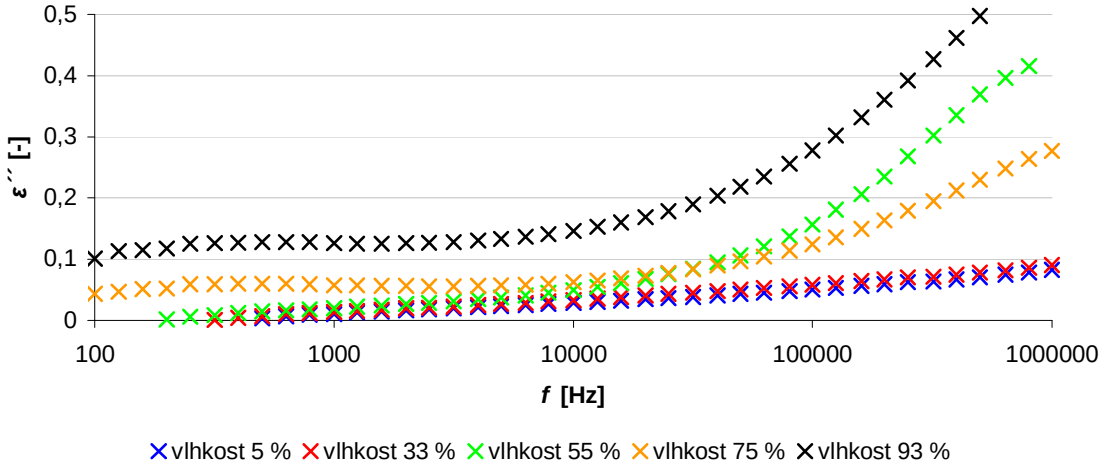


Obr. P10: Frekvenční závislost relativní permitivity pro všechny vlhkosti, vzorek 8 – 12 % slídy

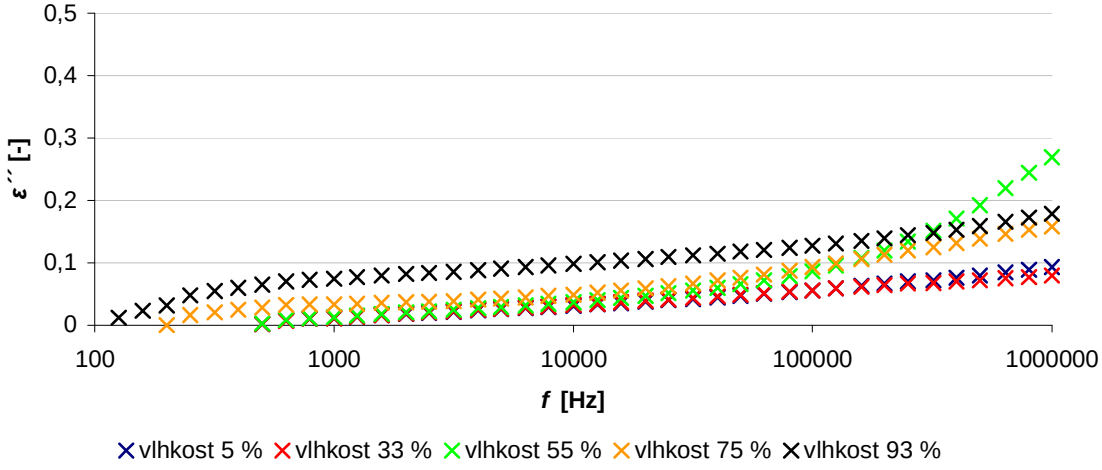
c) Frekvenční závislosti ztrátového čísla, parametr : relativní vlhkost



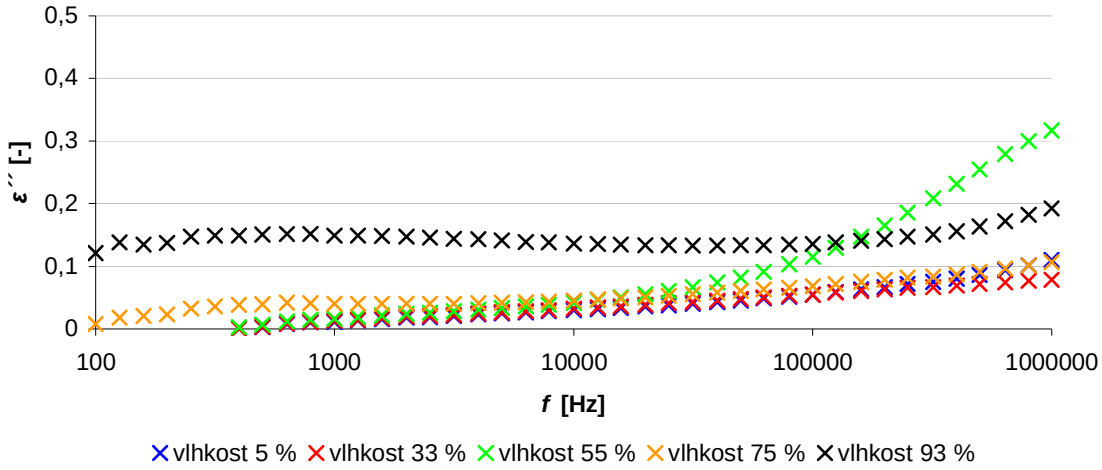
Obr. P11: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro všechny vlhkosti, vzorek 3 – bez slídy



Obr. P12: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro všechny vlhkosti, vzorek 6 – 4 % slídy

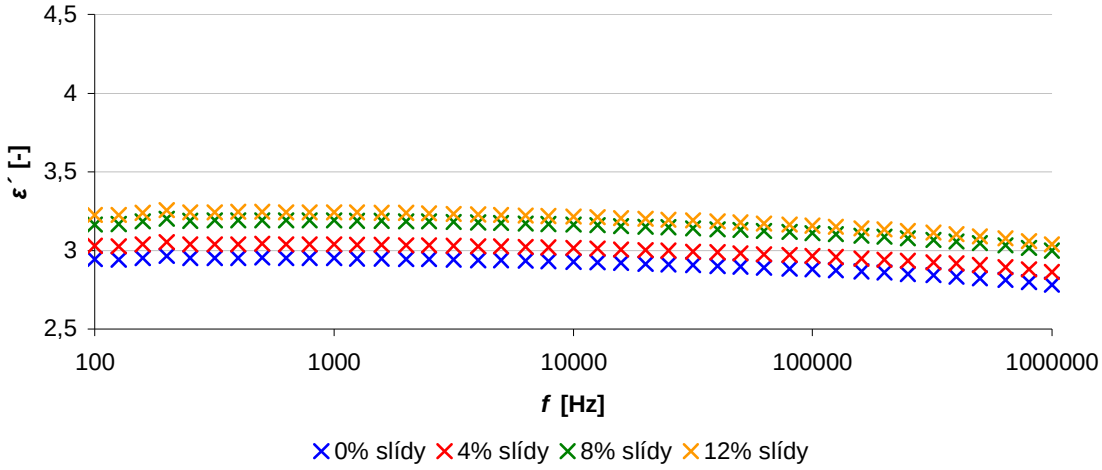


Obr. P13: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro všechny vlhkosti, vzorek 9 – 8 % slídy

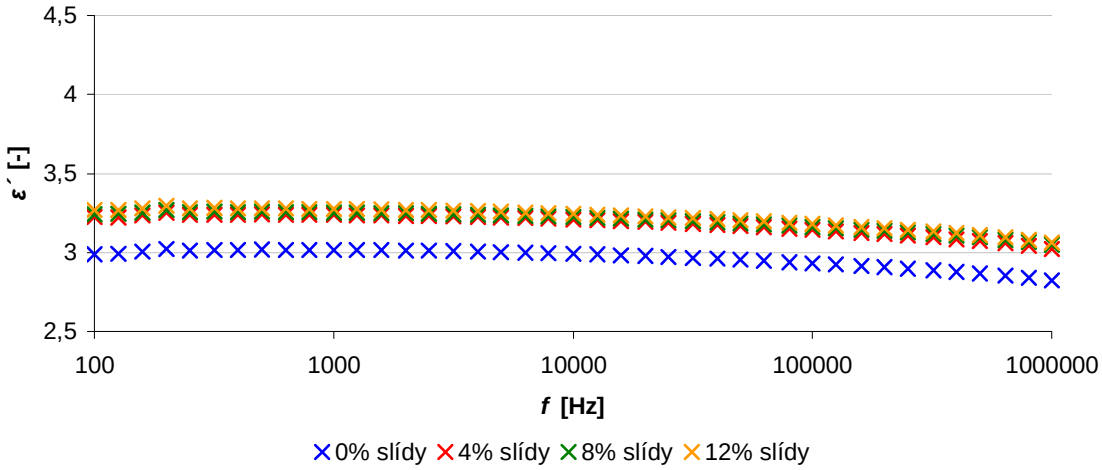


Obr. P14: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro všechny vlhkosti, vzorek 8 – 12 % slídy

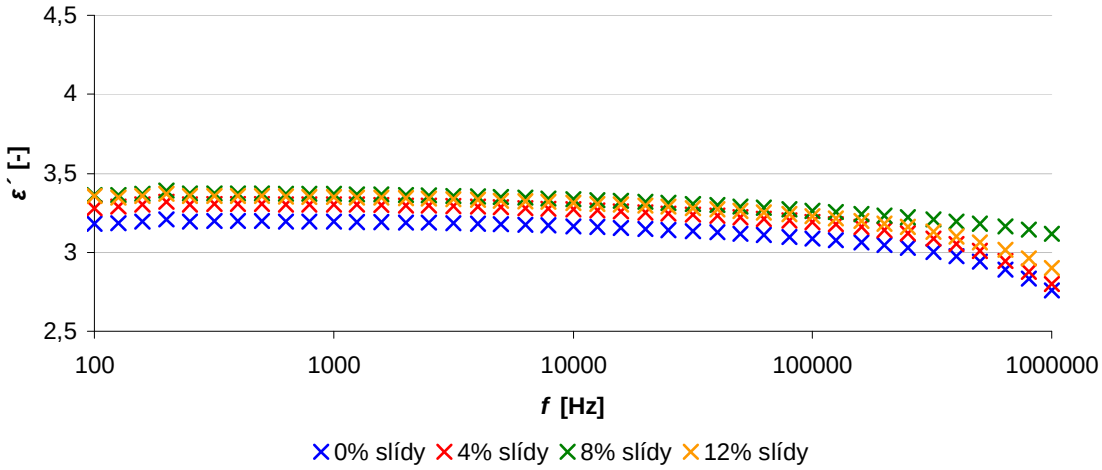
d) Frekvenční závislosti relativní permitivity, parametr : plnění slídou



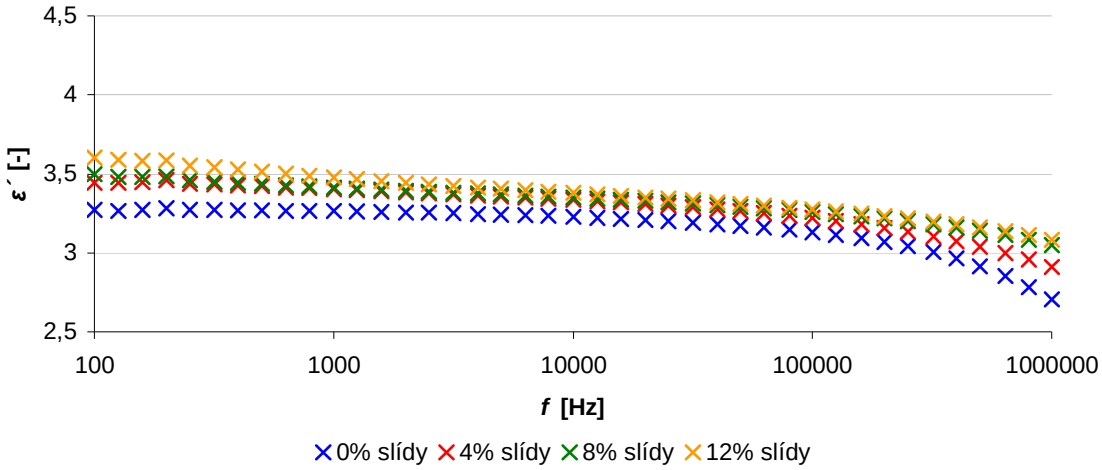
Obr. P15: Frekvenční závislost relativní permitivity pro různá plnění slídou – φ = 5 %



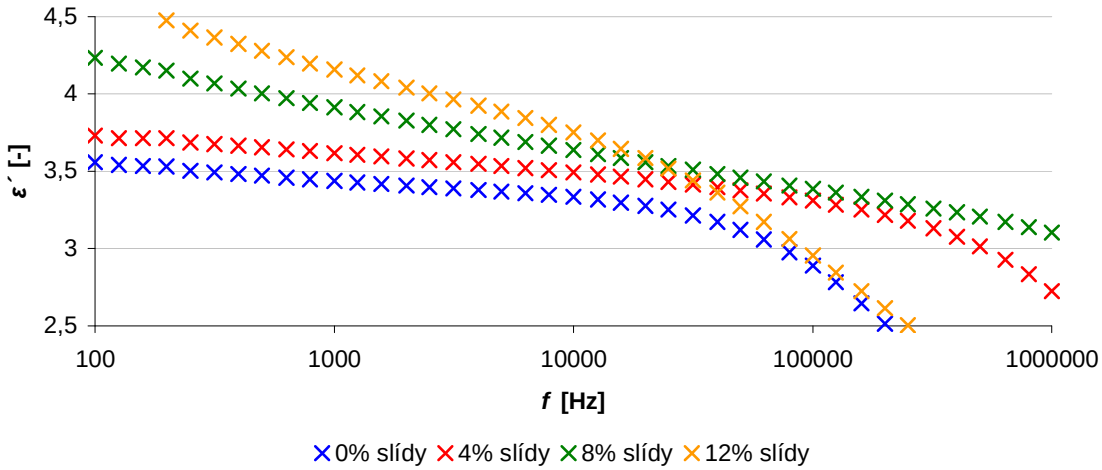
Obr. P16: Frekvenční závislost relativní permitivity pro různá plnění slídou – φ = 33 %



Obr. P17: Frekvenční závislost relativní permitivity pro různá plnění slídou – φ = 55 %

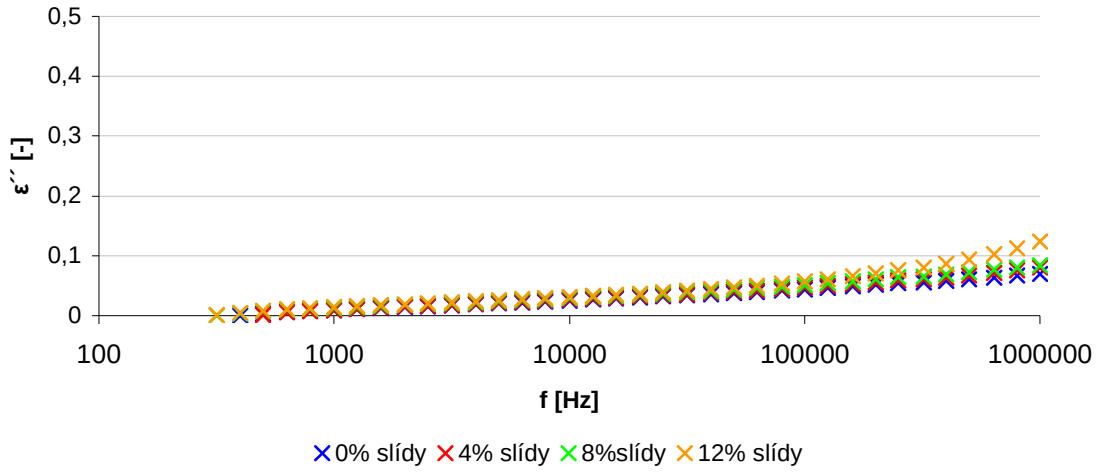


Obr. P18: Frekvenční závislost relativní permitivity pro různá plnění slídou – φ = 75 %

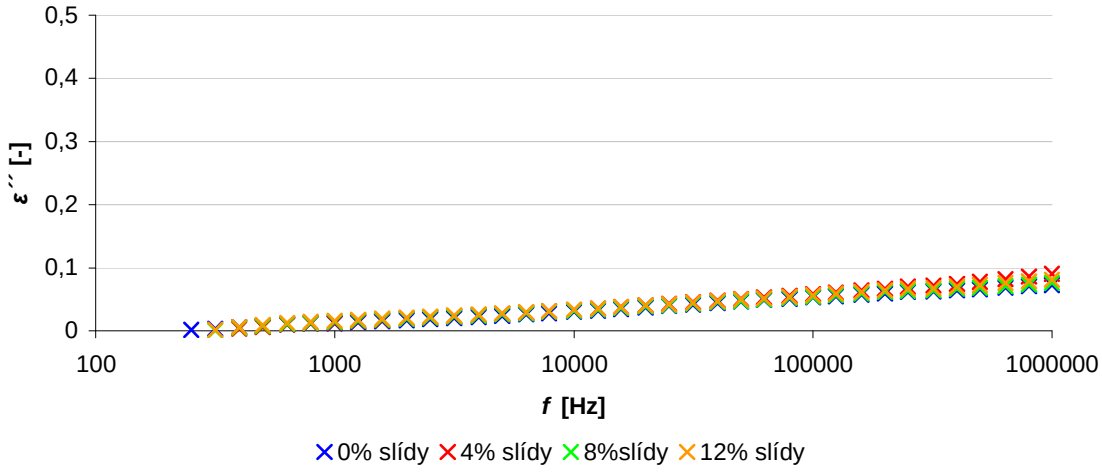


Obr. P19: Frekvenční závislost relativní permitivity pro různá plnění slídou – φ = 93 %

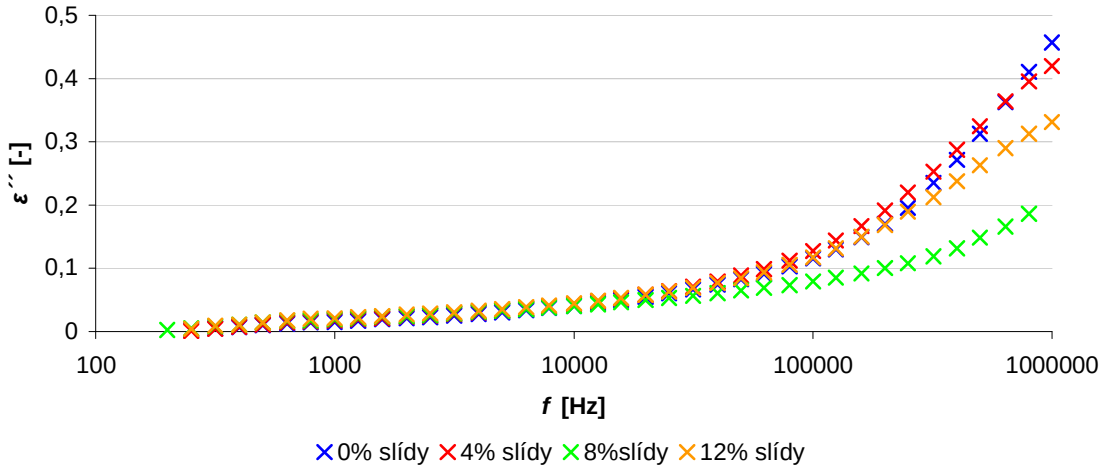
e) Frekvenční závislosti ztrátového čísla, parametr : plnění slídou



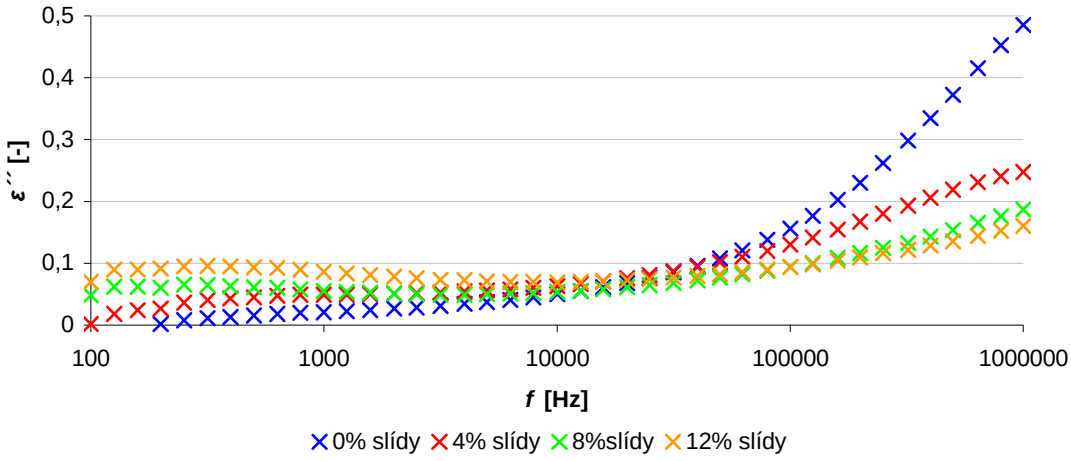
Obr. P20: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro různá plnění slídou – φ = 5 %



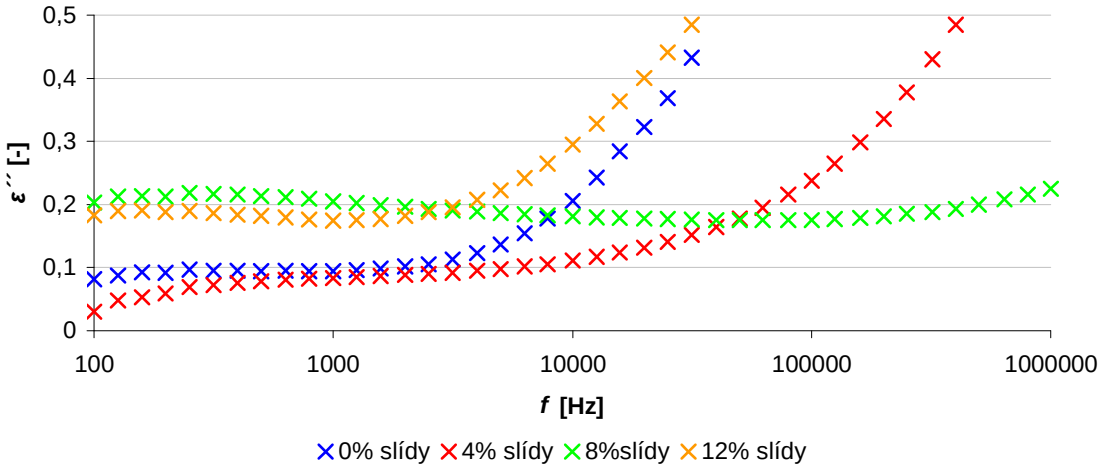
Obr. P21: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro různá plnění slídou – φ = 33 %



Obr. P22: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro různá plnění slídou – φ = 55 %

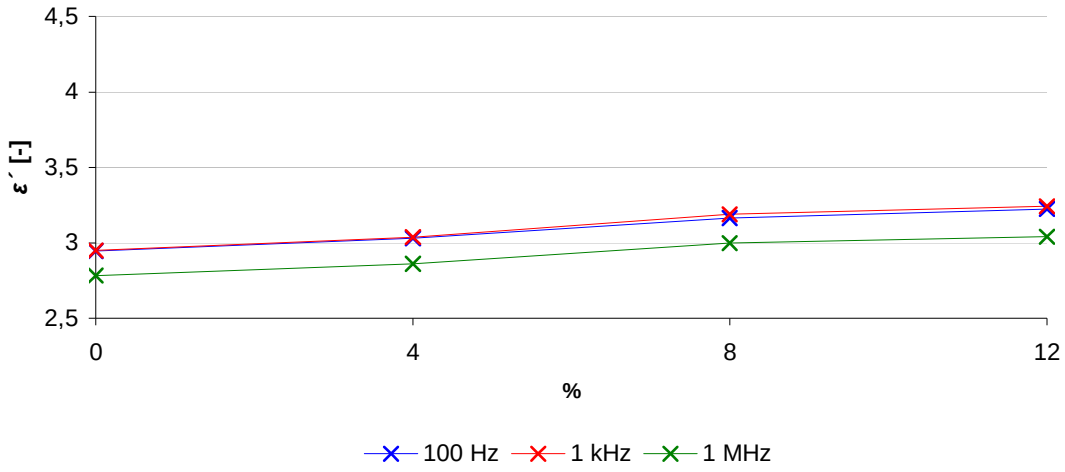


Obr. P23: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro různá plnění slídou – φ = 75 %

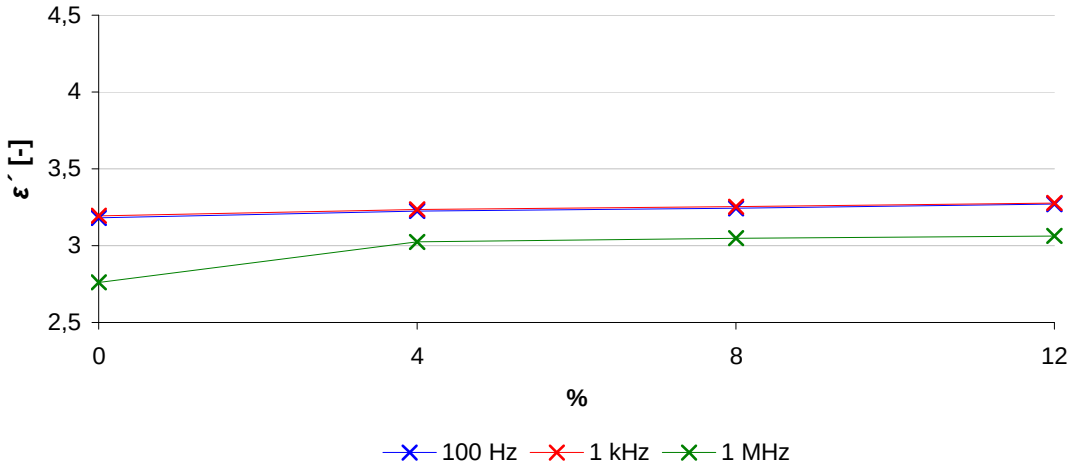


Obr. P24: Frekvenční závislost ztrátového čísla pro různá plnění slídou – φ = 93 %

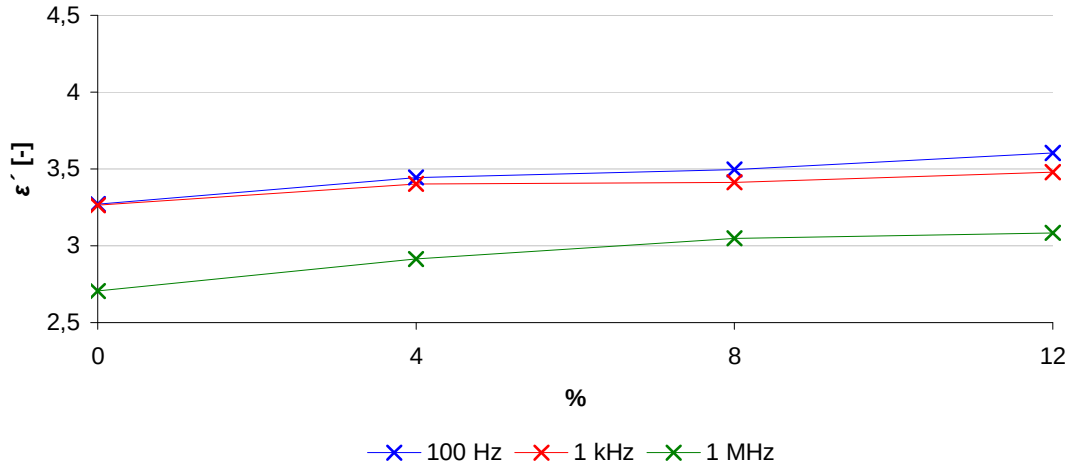
f) Relativní permitivita je funkcí hmotnostních procent slídy, parametr frekvence



Obr. P25: Závislost relativní permitivity na procentu plnění slídou, parametr frekvence – φ = 5 %

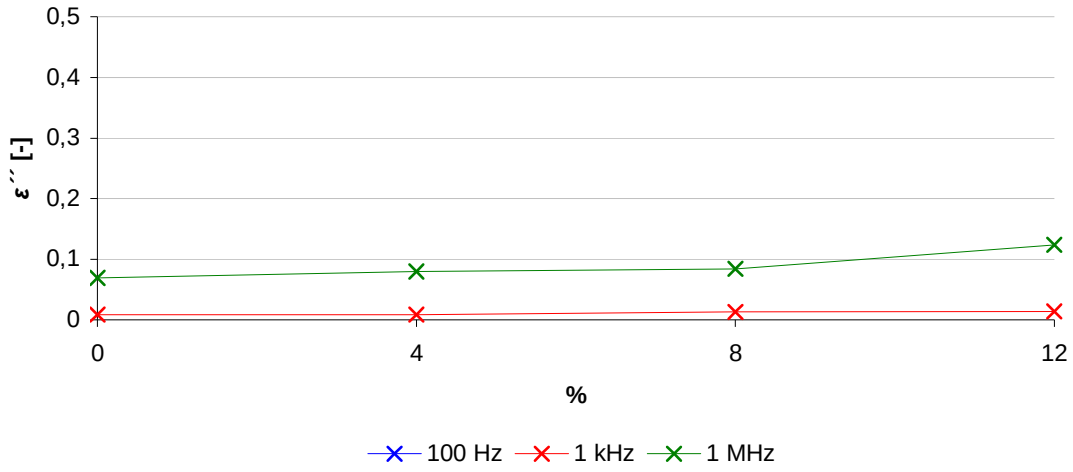


Obr. P26: Závislost relativní permitivity na procentu plnění slídou, parametr frekvence – φ = 55 %

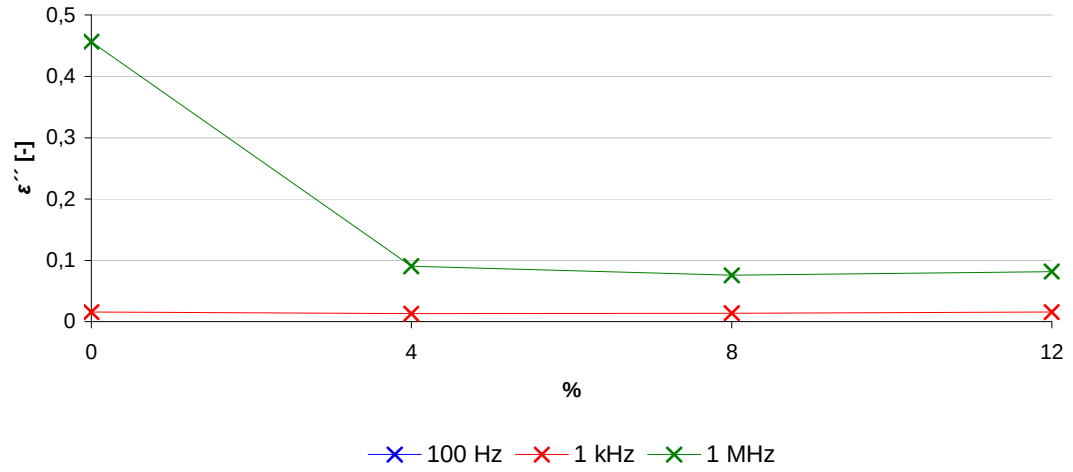


Obr. P27: Závislost relativní permitivity na procentu plnění slídou, parametr frekvence – φ = 75 %

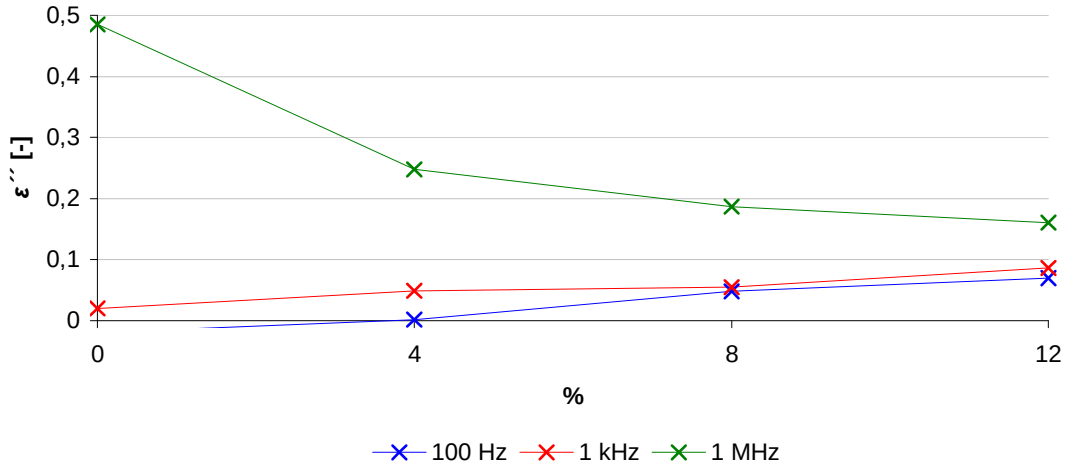
.**g)** Ztrátové číslo je funkcí hmotnostních procent slídy, parametr frekvence



Obr. P28: Závislost ztrátového čísla na procentu plnění slídou, parametr frekvence – φ = 5 %



Obr. P29: Závislost ztrátového čísla na procentu plnění slídou, parametr frekvence – φ = 55 %



Obr. P30: Závislost ztrátového čísla na procentu plnění slídou, parametr frekvence – φ = 75 %