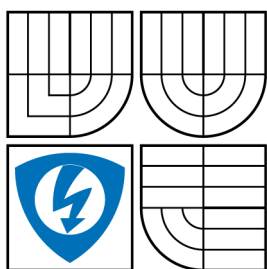


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE



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

ANALÝZA SLOŽENÉ SOUSTAVY S RUZNÝM PODÍLEM PLNIVA

ANALYSIS OF COMPOSITE WITH DIFFERENT PROPORTION OF FILLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PŘEMYSL BROŽ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2008

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Přemysl Brož
Bytem: Těrlicko, Dolní Těrlicko 151, 735 42
Narozen/a (datum a místo): 11.3.1984, Bohumín
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

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

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Analýza složené soustavy s různým podílem plniva
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zdenka Rozsivalová
Ústav: Ústav elektrotechnologie
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

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

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne: 29. 5. 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá sledováním složek komplexní permitivity v kmitočtové oblasti elektroizolačních materiálů v průběhu navlhávání pomocí metody dielektrické relaxační spektroskopie. Předmětem experimentu je impregnační lak TSA220S na bázi epoxidové pryskyřice, která byla kombinována s různým hmotnostním procentuálním plněním slídy. Připravené vzorky byly vystaveny prostředí o různých relativních vlhkostech v rozsahu 0 – 93 %.

Abstract:

This work consider with monitoring components of komplex permittivity at frequency section of electro-insulation material in process of wetting by dielectric relaxation spectroscopy. Object of this experiment is impregnating varnish TSA220S base epoxy resin accompany with different percentage by weight of mica. Prepared samples were exposed to atmosphere about the different relative wet. Wets were in range 0 – 93 %.

Klíčová slova:

Dielektrikum, impregnační lak, dielektrická relaxační spektroskopie, navlhávání, kompozity.

Keywords:

Dielectric, impregnating varnish, dielectric relaxation spectroscopy, wettability, composite.

Bibliografická citace díla:

BROŽ, P. *Analýza složené soustavy s různým podílem plniva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalové.

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:

Chtěl bych poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Zdence Rozsivalové, dále pak Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady, návrhy a připomínky při realizaci této diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1	DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI	11
2.1.1	<i>Charakteristika dielektrik</i>	11
2.1.2	<i>Polarizace dielektrik</i>	12
2.1.3	<i>Polarizační mechanismy</i>	13
2.1.4	<i>Zvláštní polarizační jevy</i>	15
2.1.5	<i>Polarizace dielektrik ve stejnosměrném elektrickém poli</i>	16
2.1.6	<i>Polarizace dielektrik ve střídavém elektrickém poli</i>	18
2.1.7	<i>Dielektrická pevnost</i>	23
2.1.8	<i>Průraz dielektrika</i>	24
2.2	ELEKTROIZOLAČNÍ LAKY	26
2.2.1	<i>Klasifikace laků</i>	27
2.2.2	<i>Rozdělení laků z hlediska jejich použití</i>	28
2.2.3	<i>Rozdělení laků z chemického hlediska</i>	29
2.2.4	<i>Požadavky na laky</i>	30
2.3	SLÍDA S SLÍDOVÉ VÝROBKY	30
2.3.1	<i>Slída</i>	30
2.3.2	<i>Slídové výrobky</i>	31
2.4	KOMPOZITY	32
2.4.1	<i>Permitivita složené soustavy</i>	33
2.5	DIELEKTRICKÁ RELAXAČNÍ SPEKTROSKOPIE	35
2.5.1	<i>Princip dielektrické relaxační spektroskopie</i>	35
2.5.2	<i>Empirické funkce rozložení relaxačních dob</i>	36
2.6	STÁRNUTÍ DIELEKTRICKÝCH MATERIÁLŮ	39
2.6.1	<i>Činitelé stárnutí dielektrických materiálů</i>	39
2.6.2	<i>Navlhavost a nasákavost látek</i>	40
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
3.1	ZKUŠEBNÍ VZORKY	41
3.2	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	47
3.2.1	<i>Měřicí zařízení</i>	47
3.2.2	<i>Elektrodový systém</i>	50
3.3	POSTUP MĚŘENÍ EXPERIMENTU	52
3.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	53
3.5	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	69
4	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74

Seznam použitých symbolů

B	[-]	korekční součinitel
c	[m]	šířka mezery
C, C_0	[F]	kapacita, geometrická kapacita
C_p	[F]	parazitní kapacita
d_m	[m]	průměr měřicí elektrody
D, D_0	[Cm ⁻²]	elektrická indukce, elektrická indukce ve vakuu
E	[Vm ⁻¹]	intenzita výsledného elektrického pole
E_l, E_0	[Vm ⁻¹]	intenzita lokálního, vnějšího elektrického pole
E_p	[Vm ⁻¹]	elektrická pevnost
f	[Hz]	kmitočet
G_0	[S]	parazitní vodivost
h	[m]	tloušťka vzorku
j	[-]	imaginární jednotka
k	[JK ⁻¹]	Boltzmannova konstanta (1,381.10 ⁻²³)
l	[m]	tloušťka
L_s	[H]	parazitní indukčnost
n	[m ⁻³]	koncentrace polarizovatelných částic
$P, P(t)$	[Cm ⁻²]	polarizace (vektor polarizace), okamžitá hodnota polarizace
P_s	[Cm ⁻²]	ustálená hodnota polarizace
R_s	[Ω]	parazitní impedance
R_v	[Ω]	vnitřní odpor
S_{ef}	[m ²]	efektivní plocha
t	[s]	čas
$tg \delta$	[-]	ztrátový činitel
Y_0	[S]	rozptylová admitance
U	[V]	napětí
V	[m ³]	objem
Z_s	[Ω]	ztrátová impedance
Z_m	[Ω]	měřená impedance
Z_{vz}	[Ω]	impedance vzorku
α	[-]	parametr distribuce relaxačních dob
α_0	[-]	polarizovatelnost částic
β	[-]	parametr distribuce relaxačních dob
γ_v	[Sm ⁻¹]	vnitřní konduktivita
δ	[rad]	ztrátový úhel

ε^*	[-]	komplexní permitivita
ε'	[-]	reálná složka komplexní permitivity
ε''	[-]	imaginární složka komplexní permitivity (ztrátové číslo)
ε_p''	[-]	polarizační složka ztrátového čísla
ε_v''	[-]	vodivostní složka ztrátového čísla
ε_s	[-]	statická permitivita
ε_∞	[-]	optická permitivita
ε_r	[-]	relativní permitivita
ε'_s	[-]	permitivita soustavy
ε'_1	[-]	permitivita dispergovaných částic
ε'_2	[-]	permitivita prostředí
ε'_{ef}	[-]	efektivní permitivita
ε_0	[Fm ⁻¹]	permitivita vakua (8,854.10 ⁻¹²)
μ_i	[Cm]	indukovaný dipólový moment
χ	[-]	dielektrická susceptibilita
τ, τ_0	[s]	relaxační doba, nejpravděpodobnější relaxační doba
ω, ω_0	[rad s ⁻¹]	kruhový kmitočet, kruhový kmitočet relaxačního maxima
v_1	[-]	objemová část dispergovaných částic
v_2	[-]	objemová část prostředí

1 ÚVOD

Současný rozvoj techniky neustále klade stále se zvyšující požadavky na technická zařízení. Životnost elektrotechnických zařízení je výrazně ovlivněna životností použitých elektroizolačních materiálů. Volba vhodného materiálu vyžaduje důkladnou znalost jeho vlastností a poznání zákonitostí změn daných vlastností při působení provozních podmínek. Provozní podmínky mění jejich vlastnosti především působením teploty a elektrického pole a dochází ke stárnutí materiálů. Projevuje se postupným znehodnocováním dielektrik a tím trvalým zhoršením funkčních vlastností.

Na stárnutí závisí doba života izolačního systému a tím i doba života elektrického zařízení vzhledem k jeho spolehlivosti a bezpečnosti v provozu a ekonomickému využití materiálu a práce. Dobou života se rozumí doba, po kterou je zařízení schopno konat normální funkci. Životnost má velký ekonomický význam.

Významnými elektroizolačními materiály jsou elektroizolační laky. Jejich použití je mnohostranné. Nejvíce se využívají jako laky impregnační. Dále se elektroizolační laky používají na lakování vodičů, na impregnaci vinutí elektromotorů, na tmelení a také v jiných odvětvích průmyslu.

V diagnostice elektrických vlastností materiálu je možné použít mnoho zkušebních metod. Jednou z nedestruktivních diagnostických metod je dielektrická relaxační spektroskopie. Jejím principem je sledování odezvy polarizace částic na přiložené elektrické pole. Tuto metodu lze využít ke studiu látek v časové i kmitočtové oblasti. Tato práce se bude zabývat diagnostikou na základě změny kmitočtu elektrického pole.

Úkolem této diplomové práce je zkoumání technologie přípravy vzorků, prošetření vlivu prostředí o různé relativní vlhkosti na kmitočtové závislosti složek komplexní permitivity impregnačního laku. Zkoumaným vzorkem je epoxidová pryskyřice jantarové barvy s označením TSA 220S plněné různým procentem mleté slídy.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

2.1.1 Charakteristika dielektrik

Dielektrikum je látka, která má schopnost polarizace (tedy být polarizována). Má schopnost po přiložení elektrického pole akumulovat elektrickou energii (kondenzátor). Tato vlastnost je využívána u kondenzátorů, obzvláště u vysokofrekvenčních. Dielektrické materiály jsou také užívané při budování vysokofrekvenčních přenosových vedení.

Ideální dielektrikum neobsahuje žádné volné elektrické náboje, jeho vnitřní rezistivita je nekonečně velká a vyznačuje se velkou elektrickou pevností. Každý reálný izolant však obsahuje nepatrné množství volných nosičů elektrických nábojů a je tedy látkou s velmi malou elektrickou vodivostí. U elektroizolačních látek se předpokládá, že se jedná o vodivost iontového charakteru, kde volnými nosiči nábojů jsou ionty příměsí a nečistot.

V praxi je nejvíce dielektrických materiálů ve skupenství pevném. Například porcelán (keramický), sklo, slída, plasty, a oxidy z různých kovů. Některé plyny a kapaliny mohou sloužit jako dobré dielektrické materiály. Suchý vzduch je výborné dielektrikum a je používán v proměnných kondenzátorech a v některých typech přenosových vedeních. Vakuum je velice účinné dielektrikum. Hodnota relativní permitivity vakua je rovna jedné, protože ve vakuu k polarizaci nemůže docházet. Pro jakékoliv jiné elektroizolační látky nabývá hodnot větších než jedna. Její velikost se pohybuje od hodnot o něco málo větších než jedna pro plynné izolanty přes hodnoty řádově několika jednotek až desítek pro izolační materiály tuhé a kapalné a až po hodnoty řádově 10^4 pro feroelektrika. Velikost relativní permitivity je určena dle uplatňujících se polarizačních mechanismů.

Čím nižší jsou dielektrické ztráty (poměr ztrát energie jako teplo), tím více efektivní je dielektrický materiál. Materiály s nízkou permitivitou jsou vakuum, suchý vzduch a suché plyny jako helium a dusík. Materiály s malou dielektrickou stálostí jsou keramiky, destilovaná voda, papír, slída, polyetylén a sklo. Kovové oxidy mají vysokou dielektrickou stálost.

U materiálů jako je hliníkový oxid je výhoda, že umožňuje výrobu velkokapacitních kondenzátorů. Ale tyto materiály nejsou obecně neschopné odolávat tak intenzivním elektrostatickým polím, jakým odolá například vzduch. Je-li elektrické napětí přes dielektrický materiál příliš velké a současně se elektrostatické pole se stává příliš intenzivním,

tak se stane materiál náhle vodivým. Tento jev je nazývaný dielektrický průraz. V součástech, které užívají plyny nebo kapaliny jako dielektrický materiál, tak se tento stav obrátí, pokud se napětí sníží pod kritický bod. V součástech obsahujících pevnou dielektrickou látku má dielektrický průraz obvykle za následek stálé poškození.

2.1.2 Polarizace dielektrik

Vložení izolantu do elektrického pole nastává jev, který se nazývá polarizace dielektrika. Při polarizaci se z atomů nebo molekul dielektrika (nepolární dielektrikum) působením přitažlivé a odpudivé elektrické síly stanou elektrické dipóly, dojde k nesymetrickému rozložení částic s elektrickým nábojem uvnitř atomů nebo molekul (blíže k jedné straně elektrony, blíže ke druhé straně jádro atomu). Taková polarizace se nazývá atomová polarizace. Některé látky (polární dielektrika, např. voda) obsahují elektrické dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole. Jejich směr je ale chaotický a při polarizaci dojde k uspořádání dipólů do jednoho směru. Taková polarizace se nazývá orientační polarizace.

Všechny elektrické dipóly mají při polarizaci stejnou polaritu opačnou k polaritě vnějšího elektrického pole. Tím se velikost vnějšího elektrického pole zmenšuje. Poměr intenzity E_0 vnějšího elektrického pole k intenzitě výsledného elektrického pole E udává relativní permitivita dielektrika ϵ_r :

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E}, \quad (1)$$

Pro vektor polarizace dielektrika platí:

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

kde $\sum \mu_i$ je součet indukovaných dipólových momentů všech polarizovaných částic v objemu V , orientovaných ve směru elektrického pole. Polarizace \vec{P} je v určitém místě rovna indukovanému dipólovému momentu vztaženého na jednotku objemu.

2.1.3 Polarizační mechanismy

V dielektrických látkách se často vyskytuje současně několik druhů polarizací, přičemž slabší z nich bývají překryty mechanismy silnějšími.

Zpravidla se rozlišují :

- Jevy s rychlým průběhem, tzv. pružné (elastické) polarizace. Vyznačují se extrémně krátkou dobou trvání, proběhnou prakticky okamžitě, pružně a bez ztrát energie. Dochází při nich jen k pružnému posunutí nábojů. Nejsou závislé na kmitočtu v celém rozsahu používaných kmitočtů v elektrotechnice.
- Jevy s pomalým průběhem, tzv. relaxační polarizace. Vyznačují se tím, že po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu a s opožděním. Samozřejmě také polarizace po odpojení pole pomalu ubývá. Proto jsou doby potřebné k ustálení těchto jevů relativně dlouhé. Časový průběh jejich doznívání je exponenciální a je charakterizován časovou konstantou τ , tzv. relaxační dobou. Pomalé polarizace jsou značně závislé na teplotě. Jsou vždy provázeny ztrátami energie v dielektriku, které se tím ohřívá.

Klasifikace polarizačních mechanismů

- Polarizace rychlé (pružné)
 - Polarizace iontová (pružná)
 - Polarizace elektronová
- Polarizace pomalé (relaxační)
 - Polarizace iontová (relaxační)
 - Polarizace dipólová
- Polarizace zvláštní
 - Polarizace mezivrstevová (migrační) - polarizace rychlá
 - Polarizace samovolná (spontánní) - polarizace pomalé
 - Polarizace rezonanční - polarizace rychlá
 - Polarizace trvalá (permanentní) - polarizace pomalá

Elektronová polarizace je způsobena posunem elektronů ze svých rovnovážných poloh, či přesněji deformací jejich drah. Elektrony se posunou do určité malé vzdálenosti, menší, než jsou rozměry atomů nebo molekul. Každá částice při elektronové polarizaci získává indukovaný elektrický dipólový moment. Doba ustálení je řádově 10^{-16} až 10^{-14} s. Vyskytuje se u všech dielektrik a bývá překryta jiným typem polarizace. Tento jev nezávisí na teplotě.

Iontová polarizace se vyskytuje v iontových krystalech s pevným uložením iontů. Ionty, které jsou vzájemně vázané elektrostatickými silami, se působením vnějšího elektrického pole pružně posunou. Doba ustálení této polarizace je řádově 10^{-11} až 10^{-13} s, proto se při této polarizaci nevyskytují dielektrické ztráty v celém rozsahu technicky používaných kmitočtů. Následkem iontové polarizace je změna velikosti a směru dipólového momentu.

Dipólová polarizace je nejdůležitější relaxační polarizací a liší se od elektronové a iontové tím, že je spojena s tepelným pohybem částic. Vyskytuje se v látkách, v nichž jsou dipólové molekuly jen velmi slabě vázány anebo úplně volné, proto při působení vnějšího elektrického pole se mohou natáčet do směru pole. Se vzrůstající teplotou se polarizace zesiluje. Zároveň vzroste i energie tepelného pohybu molekul a zmenšuje se vliv elektrického pole. Doba ustálení této polarizace u nízkomolekulárních látek je řádově 10^{-8} až 10^{-12} s, u makromolekulárních je o mnoho řádů vyšších.

Iontová - relaxační polarizace je to případ nejjednodušší tepelné polarizace iontů. Vyskytuje se v dielektrikách složených z iontů nebo obsahujících skupiny molekul nebo atomů, volné ionty příměsí nebo nečistot, které jsou slabě vázány k sousedním částicím a snadno reagují na vnější elektrické pole. Probíhá například v anorganických sklech, v keramických látkách s podílem skelné fáze, v anorganických krystalických látkách s iontovou vazbou a netěsným uložením částic. Je provázána ztrátami energie v dielektriku, je závislá na teplotě a na kmitočtu. Doba ustálení je 10^{-8} až 10^{-12} s.

Migrační polarizace se vyskytuje u některých reálných dielektrik s makroskopickými nehomogenitami (látky s vláknitými plnivými, lamináty, pórovité a pěnové materiály, znečištěné látky). Obsahují různé volné ionty nečistot a příměsí nebo slabě vázané nosiče nábojů. Je-li takový materiál v elektrickém poli, pak na rozhraní těchto různých prostředí se volné náboje hromadí a stávají se nepohyblivými (vázanými). Tato polarizace se označuje také jako

mezivrstvodá. Je to nejpomalejší ze všech polarizací. Je závislá na teplotě a kmitočtu, nepružná a je provázána ztrátou energie.

Spontánní polarizace se vyskytuje ve feroelektrických látkách. Jejím charakteristickým znakem je výrazné maximum v závislosti permitivity ϵ' na teplotě. Tato polarizace je spojena s velkými dielektrickými ztrátami. V látkách se samovolnou polarizací jsou jednotlivé domény, ve kterých jsou všechny částice plně a spontánně polarizovány v důsledku působení vnitřních výměnných sil i bez přítomnosti elektrického pole. Směr orientace jednotlivých elektrických momentů je v různých doménách různý, proto se materiál jako celek jeví nepolarizovaný. Působením vnějšího elektrického pole dochází k orientaci elektrických momentů domén ve směru pole, což se navenek jeví jako velmi silná polarizace. Je provázána ztrátami energie v látce, je závislá na kmitočtu, na intenzitě elektrického pole a také je výrazně závislá na teplotě.

Permanентní polarizace se vyskytuje v některých polárních látkách s malou elektrickou vodivostí. Vyskytuje se u elektretů, což jsou permanentně zpolarizovaná tělesa.

Rezonanční polarizace se vyskytuje u všech dielektrik a vzniká následkem rezonance vlastních (tepelných) kmitů částic s elektrickým nábojem s kmitu vnějšího elektrického pole. Projevuje se v optickém spektru (což jsou velmi vysoké kmitočty), v elektrotechnice se obvykle s takovými kmitočty nepracuje.

2.1.4 Zvláštní polarizační jevy

Pyroelektrický jev

Vyskytuje se u všech přirozených krystalických elektretů, což jsou některé krystaly bez středové souměrnosti, spontánně polarizované. Na koncových povrchových plochách jsou permanentní vázané náboje. Při zahřátí nebo chlazení krystalu se změní polarizace uvnitř krystalu a tím se změní polarita. Následkem této změny teplot se pozitivní a záporné náboje přesunou na opačné konce skrz migrování (materiál se stává polarizován) a z toho důvodu je elektrický potenciál stálý. Pyroelektriky jsou všechny látky se spontánní polarizací.

Elektrostrikce

Je to změna geometrických rozměrů dielektrického tělesa při přiložení elektrického pole. Elektrické dipóly se ve směru pole navzájem přitahují. Přiblížením molekul znamená mechanické deformace, kterým brání síly pružnosti. Tak vznikne smrštění dielektrika ve směru pole (stovky voltů ~ miliontiny procenta). Podobně při stlačení dielektrika dojde k potenciálnímu rozdílu (0,1 MPa ~ několik voltů), což nemá praktický význam. Vyskytuje se u všech dielektrik.

Jen u některých krystalů (středově nesouměrných) se pozoruje neobyčejně značná elektrostrikce. Změna $\Delta l \sim E^2$.

Piezelektrický jev

Při mechanickém namáhání (tlak, tah, ohyb, krut) piezelektrického krystalu nebo vhodně vyřezané destičky se na stlačených plochách objeví elektrické napětí od nekompensovaného náboje (přímý piezelektrický jev). Obrácený (reciproký) piezelektrický jev je schopnost deformace (změny rozměrů nebo tvaru krystalu) působením vnějšího elektrického pole. Jedná se v podstatě o polarizaci látky tlakem. Napětí bývá v řádu 10^{-7} V.Pa⁻¹. Piezelektrický jev se projevuje pouze v krystalech, jejichž elementární buňky nemají elektrický střed symetrie (jsou středově nesouměrné, acentrické). Využívá se např. pro rezonanční prvky oscilátorů, zdroje ultrazvuku, mikrofony, tlakoměry apod. Piezelektrické vlastnosti mají všechny látky feroelektrické, existuje však mnoho piezelektrických látek, které nejsou feroelektriky. Piezelektrika jsou například křemen, turmalín (boritokřemičitan Al-Mg-Ca) a četné látky keramické. Rozdíly mezi elektrostrikcí a piezelektrickým jevem:

- elektrostrikce se vyskytuje u všech dielektrik, piezelektrický jev pouze u krystalických látek s anizotropními vlastnostmi,
- změna Δl u elektrostrikce je úměrná energii elektrického pole, akumulované v látce (tj. úměrná E^2), u piezelektrického jevu je $\Delta l \sim E$.

2.1.5 Polarizace dielektrik ve stejnosměrném elektrickém poli

Základní makroskopické veličiny pro popis elektrických jevů v dielektriku jsou intenzita elektrického pole \vec{E} , elektrická indukce \vec{D} a polarizace \vec{P} . Jsou to vektory o určité velikosti a směru. Velikost indukovaných dipólových momentů je úměrná velikosti působící intenzity lokálního elektrického pole. Vztah mezi touto úměrností je vyjádřen:

$$\vec{\mu}_i = \alpha_0 \vec{E}_l, \quad (3)$$

kde μ_i je indukovaný dipólový moment, konstanta úměrnosti α_0 je polarizovatelnost částic a E_l je intenzita lokálního elektrického pole.

Stav polarizovaného dielektrika lze popsat vektorem polarizace \vec{P} , který je definován vztahem:

$$\vec{P} = \frac{\sum_i \vec{\mu}_i}{V} = n \alpha_0 \vec{E}_l, \quad (4)$$

přičemž se sčítání dipólových momentů provádí v objemu V . Vektor \vec{P} představuje úhrnný dipólový moment zorientovaný ve směru pole v objemové jednotce dielektrika a n je koncentrace polarizovatelných částic. Tento vztah (4) je také označován jako Clausiova rovnice.

Hustota náboje na elektrodách vakuového kondenzátoru je rovna elektrické indukci D_0 , je vyjádřena vztahem:

$$\vec{D}_0 = \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (5)$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$).

Po vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole o konstantní intenzitě \vec{E} se zvětší elektrická indukce \vec{D} v důsledku polarizačních jevů v daném prostoru oproti indukci ve vakuu \vec{D}_0 o hodnotu vektoru polarizace \vec{P} :

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (6)$$

V praktických aplikacích se pro charakterizaci polarizačních dějů používá nejčastěji permitivita. Je konstantou úměrnosti mezi vektorem intenzity elektrického pole a vektorem elektrické indukce. Protože se permitivita používá téměř výhradně ve formě relativní, udává kolikrát je indukce v dielektriku větší než ve vakuu, zapisuje se ve tvaru:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon' \vec{E}, \quad (7)$$

Relativní permitivita vakua je rovna jedné, protože ve vakuu nemůže docházet k polarizaci. Pro všechny ostatní dielektrické látky je hodnota relativní permitivity větší než jedna. Není materiálovou konstantou, protože se u ní projevuje značná teplotní a u feroelektrik i napěťová závislost. Proto se musí ke každému číselnému údaji o permitivitě přiřadit popis vnějších podmínek, při nichž byla stanovena [1].

Nejčastější případ dielektrik jsou dielektrika lineární, pro ně je polarizace přímo úměrná intenzitě elektrického pole. Proto lze psát rovnici pouze skalárně:

$$P = \chi \varepsilon_0 E, \quad (8)$$

kde χ je dielektrická susceptibilita, která má v elektrickém poli vždy kladnou hodnotu ($\chi > 0$) a ve vakuu je $\chi = 0$.

Rovnice (8) platí i v nelineárních případech, kdy χ již není konstantní, ale závisí na přiloženém elektrickém poli. Dosazením (7) a (8) obdržíme opět skalární rovnici:

$$P = (\varepsilon' - 1)\varepsilon_0 E = \chi \varepsilon_0 E, \quad (9)$$

U lineárních dielektrik nezávisí ε' na intenzitě přiloženého elektrického pole, ale zpravidla je funkcí teploty, kmitočtu elektrického pole nebo jiných veličin.

2.1.6 Polarizace dielektrik ve střídavém elektrickém poli

Při této polarizaci dochází ke zpoždování elektrické indukce za intenzitou elektrického pole v důsledku dielektrické relaxace. Pak rovnice (7) přechází pro periodické funkce času \vec{E} a \vec{D} do tvaru:

$$\hat{D}(\omega) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(\omega) \cdot \hat{E}(\omega), \quad (10)$$

kde ε^* je komplexní permitivita a ω úhlový kmitočet.

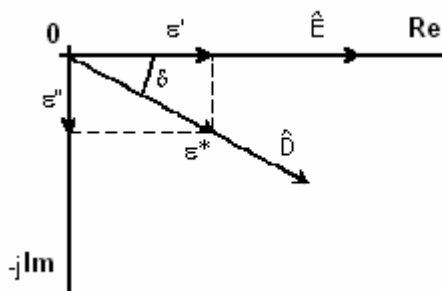
Permitivita ε^* je kmitočtově závislá komplexní veličina se zápornou fází a lze ji rozepsat na reálnou a imaginární část:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (11)$$

kde $\varepsilon'(\omega)$ je mírou polarizace dielektrika a $\varepsilon''(\omega)$ je mírou ztrát (polarizační a vodivostní, ionizační se neuvažují) vznikajících při vložení dielektrika do střídavého elektrického pole. Proto se také nazývá ztrátové číslo. V praxi se často používá veličina ztrátový činitel $\operatorname{tg}\delta$, který je definován jako poměr ztrátového čísla a relativní permitivity:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)}, \quad (12)$$

Úhel δ je úhel, o který se zpožďuje elektrická indukce D oproti intenzitě elektrického pole E . Vzájemná poloha obou složek komplexní permitivity a fázorů \hat{E} a \hat{D} při polarizaci střídavým elektrickým polem je znázorněna na obr.2.1:



Obr. 2.1: Fázorový diagram \hat{E} , \hat{D} a složky komplexní permitivity [2]

U nepolárních dielektrik nemá komplexní permitivita imaginární část a její reálná část není frekvenčně závislá.

U polárních dielektrik nastává situace, že polarizační děje nemohou sledovat rychlé změny elektrického pole okamžitě, ale se zpožděním během určité a konečně krátké doby. Mluvíme potom o tzv. dielektrické relaxaci. Paul Debye odvodil pro komplexní permitivitu teoretický vztah:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (13)$$

kde τ je relaxační doba polarizace, která je závislá na teplotě a nezávislá na čase, ϵ_s je tzv. statická permitivita (ϵ' pro $f \rightarrow 0$) a ϵ_∞ je tzv. optická permitivita (ϵ' pro $f \rightarrow \infty$).

Debyeho rovnice respektuje pouze jednu relaxační dobu. To znamená, že tato rovnice platí pro jeden mechanismus polarizace s jednou zcela konkrétní relaxační dobou. Rozdělením Debyeho rovnice (13) na reálnou a imaginární část dostaneme:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (14)$$

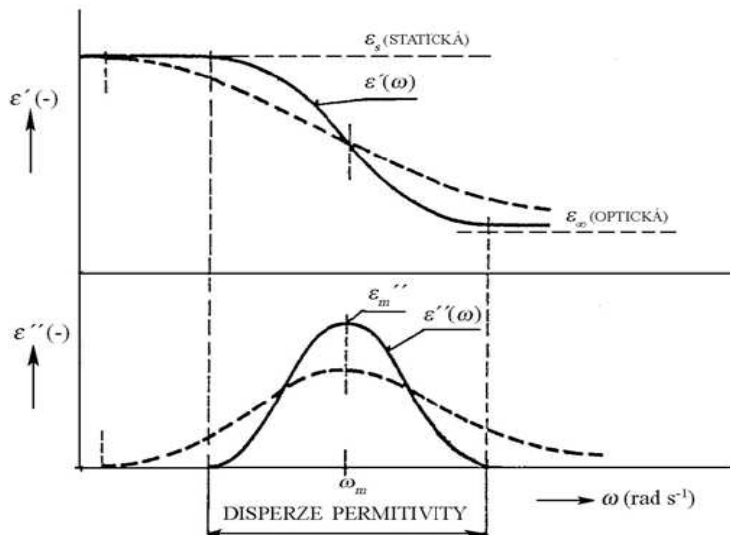
a

$$\epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (15)$$

Ze vztahů (14) a (15) lze získat výraz pro ztrátový činitel, který respektuje pouze polarizační ztráty:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{\epsilon_s + \epsilon_\infty \omega^2 \tau^2}, \quad (16)$$

Vynesením grafických závislostí $\epsilon' = f(\omega)$ a $\epsilon'' = f(\omega)$ popsaných rovnicemi (14) a (15), získáme průběhy (plnou čarou) uvedené na obr. 2.2:



Obr. 2.2: Závislost složek ϵ' a ϵ'' komplexní permitivity na kruhovém kmitočtu ($T = \text{konst.}$) [3]

Z obr.2.2 lze vidět, že ε' s rostoucím kmitočtem klesá z nejvyšší hodnoty ε_s (statické) na nejnižší hodnotu ε_∞ (optickou). Závislost $\varepsilon'' = f(\omega)$ prochází maximem při kmitočtu ω_m odpovídajícím inflexním bodu závislosti $\varepsilon' = f(\omega)$. Dielektrické ztráty mizí při limitních kmitočtech $\omega \rightarrow 0$ a $\omega \rightarrow \infty$, kdy se technický kondenzátor chová jako ideální (bezeztrátový) kondenzátor. Oblast, ve které permitivita klesá s kmitočtem, se označuje jako dielektrická disperze.

Kromě polarizačních dějů dochází v každém reálném dielektriku také k dějům vodivostním. Jejich společným projevem jsou dielektrické ztráty, jejichž důsledkem je částečná přeměna energie elektrického pole na energii tepelnou. Vodivostní složka ztrát se uplatňuje hlavně u nízkých kmitočtů. Pro imaginární složku komplexní permitivity, která respektuje vliv polarizačních i vodivostních ztrát, platí:

$$\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_v''(\omega) + \varepsilon_p''(\omega) = \frac{\gamma_v}{\omega\varepsilon_0} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (17)$$

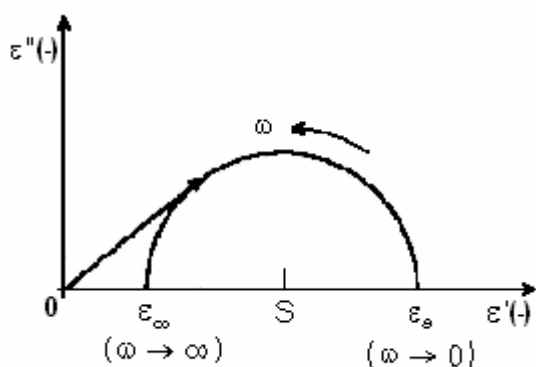
kde γ_v je vnitřní konduktivita, ε_p'' je polarizační složka ztrátového čísla a ε_v'' je vodivostní složka ztrátového čísla.

Coleho-Coleho kruhový diagram

Po úpravě Debyeho rovnic (14) a (15) dospějeme k rovnici kružnice:

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right)^2, \quad (18)$$

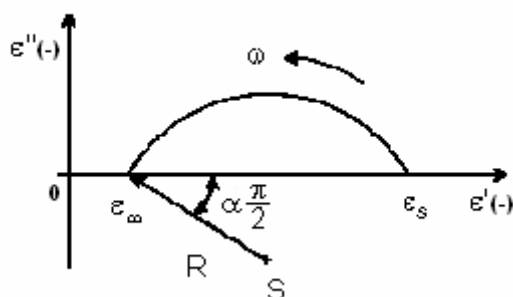
Grafickému znázornění rovnice (18) se říká „Coleho-Coleho kruhový diagram“. Jeho základní tvar je zobrazen na obr.2.3. Je sestaven na základě dříve uvedených předpokladů jednoho polarizačního mechanismu s jednou relaxační dobou. Reálná dielektrika se však skládají z více vzájemně se lišících skupin polárních molekul, jejichž relaxační doby mohou být odlišné. Průběh komplexní relativní permitivity je pak dán superpozicí jednotlivých Debyeho mechanismů s různými relaxačními dobami. V takových případech vystihuje chování kapalných a tuhých dielektrik kruhový oblouk se středem pod reálnou osou, viz. obr. 2.4.



Obr. 2.3: Coleho-Coleho kruhový diagram pro dielektrikum s jednou relaxační dobou [3]

Kružnice má poloměr $r = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}$ a souřadnice středu $S = \left[\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}; 0 \right]$.

Hodnoty ϵ' a ϵ'' vynesené v komplexní rovině vyplňují kruhový oblouk, který protíná reálnou osu ϵ' v bodech ϵ_s a ϵ_∞ .



Obr. 2.4: Coleho – Coleho kruhový diagram při distribuci relaxačních dob [3]

Pro tento případ zavedli Cole a Cole empirický vztah:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}}, \quad (19)$$

kde α je distribuční parametr $\alpha \in \langle 0;1 \rangle$, který je kmitočtově nezávislý a určuje šířku distribuce relaxačních dob. Vliv parametru α je zobrazen na obr. 2.2 přerušovanou čarou. Čím větší je α , tím širší je distribuce a tím více se střed půlkružnice Coleho-Coleho diagramu posunuje pod osu ϵ' . Pro $\alpha = 0$ přejde (19) do tvaru (13) klasického Debyeho průběhu.

Ztráty se vyskytují při působení stejnosměrného i střídavého pole a jsou provázeny ohřevem dielektrika. To způsobuje změnu fázového úhlu mezi napětím a proudem. V kondenzátoru s dielektrikem, které je připojené na zdroj střídavého napětí, předbíhá proud napětí o fázový úhel φ , který je menší než 90° . Platí $\varphi = 90^\circ - \delta$, kde δ je ztrátový úhel, který je mírou nedokonalosti dielektrika.

2.1.7 Dielektrická pevnost

Jedná se o fyzikální pojem vyjadřující odolnost materiálů vůči elektrickému poli. Používá se v následujících významech:

- Hodnota intenzity elektrického pole, při které pro daný izolant dochází k tzv. průrazu a tento materiál se stává vodivý.
- V daném uspořádání, kdy izolant je opatřen elektrodami, se jedná o minimální napětí, při jehož přiložení nastane průraz.

$$E_p = \frac{U_p}{l}, \quad (20)$$

kde U_p je průrazné napětí a l je tloušťka izolantu v místě průrazu nebo přeskočení. Experimentálně lze zjistit, že elektrická pevnost E_p s dobou působení klesá. Čím menší napětí působí na izolant, tím delší doba uplyne, než dojde k průrazu. Podle toho se rozlišuje elektrická pevnost:

- rázová
- krátkodobá
- minutová (analogicky sekundová, případně hodinová)
- trvalá, která je prakticky nezávislá na době působení napětí a odpovídá napětí, které izolant snese nekonečně dlouhou dobu.

Hodnoty elektrické pevnosti E pro některá dielektrika:

Tab. 2.1: Hodnoty elektrické pevnosti E pro některá dielektrika [4]

Látka	E [10^6 V.m^{-1}]
Vzduch	3
Sklo	14
Papír	30
Polystyrén	50

2.1.8 Průraz dielektrika

Pokud působení silného elektrického pole překročí pro daný materiál charakteristickou kritickou mez, dojde k prudkému nárůstu koncentrace volných nosičů elektrického náboje i jejich pohyblivosti. Na dráze elektrického proudu se díky velké elektrické síle vytrhují elektrony z atomů nebo molekul. Důsledkem toho je prudký pokles původně značné rezistivity daného materiálu, tzn. velmi rychlý pokles izolační schopnosti, dojde k „nekontrolovatelnému“ nárůstu konduktivity. Proces končí výbojem, kdy jsou původně izolovaná místa s různým potenciálem spojena vodivou cestou. Může dojít k trvalému nebo k dočasnému poškození dielektrika.

Vzniklý výboj má dvě stádia:

- Prudký nárůst konduktivity izolantu.
- Výboj.

Mechanismy těchto jevů se liší zejména v závislosti na skupenství prostředí v němž se odehrávají. Následně po odeznění vlastního výboje se projeví a uplatní procesy mající ve svém důsledku výrazné degradační účinky.

O průrazu mluvíme v souvislosti se vznikem výboje v pevných izolantech. Jedná se o jev, který je spojen s poklesem napětí na elektrodách, nárůstem proudu a se zhoršením izolačních vlastností prostředí.

O přeskoku mluvíme v souvislosti s úplným výbojem v izolantech plynného nebo kapalného skupenství. Jev je provázen okamžitým poklesem napětí na elektrodách a nárůstem proudu. Rozdíl oproti průrazu v pevných materiálech je v tom, že zhoršení

izolačních vlastností je pouze dočasné. Plynné a kapalné izolanty mají vlastnost regenerovat se. O přeskoku mluvíme i tehdy, pokud dojde k výboji na rozhraní pevného a kapalného nebo plynného izolantu. Z hlediska mechanismů probíhajících v pevných látkách při elektrickém namáhání obecně rozlišujeme tři způsoby průrazu pevných izolantů.

Čistě elektrický průraz

Velikost průrazného napětí prakticky nezávisí na teplotě ani na době působení přiloženého napětí. Energie elektrického pole je tak velká, že způsobí okamžitou destrukci v určitém místě objektu. Je ovlivňována homogenitou elektrického pole, chemickým složením a strukturou daného izolantu. K tomuto typu průrazu dochází, když je vyloučen ohřev izolantu a tím procesy stárnutí způsobené vlivem teploty a elektrického pole.

Tepelný průraz

Vyznačuje se výraznou závislostí průrazného napětí na teplotě a délce působení přiloženého napětí. Proto někdy mluvíme o elektrotepelném průrazu. Nehomogenita vlastního izolantu nemá takový vliv jako v případě čistě elektrického průrazu. Tepelný průraz vzniká přehřátím izolantu způsobený Joulovými nebo dielektrickými ztrátami anebo kombinací obou.

Elektrochemický průraz

Vzniká dlouhodobým působením elektrického pole na izolant. V izolantu pak vznikají elektrochemické procesy, které postupně zhoršují jeho vlastnosti a v konečném důsledku výrazně snižují jeho elektrickou pevnost. Tento druh průrazu v některých případech nepovažujeme za samostatný, protože se vlastní mechanismus průrazu nejčastěji realizuje formou tepelného průrazu.

Velikost maximálního elektrického pole, při němž ještě nedojde k průrazu, se nazývá dielektrická pevnost a závisí na velikosti práce, potřebné k ionizaci. Možnost průrazu též charakterizuje průrazné napětí, které udává nejmenší velikost napětí, které způsobí průraz při dané tloušťce dielektrika.

2.2 Elektroizolační laky

Elektroizolační laky a živice se používají na lakování vodičů, na impregnaci vinutí elektromotorů, transformátorů a jiných elektrotechnických zařízení, dále na tmelení, pouzdření v elektrotechnice, ale i v jiných odvětvích průmyslu, jako je strojírenství, chemický nebo automobilový průmysl. Charakteristickou vlastností těchto materiálů je přechod z kapalného (plastického) stavu do stavu tuhého, ve kterém se dosahuje vynikajících mechanických a elektrických vlastností a také vykazuje vysokou trvalou teplotní odolnost. Elektroizolační látky a živice se dodávají dle příslušných norem nebo technických podmínek dohodnutých s uživatelem. Impregnanty, které obsahují reaktivní rozpouštědla (styrén, diallylfthalát, diakrylát) jsou určeny na impregnaci všech typů vinutí elektrických točivých strojů a transformátorů. Vyznačují se hlavně krátkým časem vytvrzování, malým množstvím emisí bez negativního vlivu na životní prostředí, časově neomezenou zpracovatelností, odolností vůči freonům, rozpouštědlům, transformátorovému oleji a radioaktivnímu záření. Vhodné jsou pro technologie impregnace kontinuálním nebo diskontinuálním máčením při atmosférickém tlaku nebo ve vakuu, při rotaci a zakapávání.

Jejich hlavním úkolem je vyplnění všech volných (prázdných) míst v izolaci elektrotechnických zařízení při jejich impregnaci. Tím se zvýší elektrická pevnost,lepší tepelná vodivost izolace a vytvoří se suchý lakový povlak, neboli film na povrchu.

Dá se říci, že izolační laky jsou koloidní disperze tuhých i kapalných látek v rozpouštědlech a ředidlech. Z látek to jsou: přírodní a syntetické pryskyřice, termoplastické polymery, asfalty a rostlinné oleje. Po odstranění rozpouštědel a ředitel se vytvářejí tzv. filmotvorné složky (lakový film). Obsah filmotvorných složek v lacích charakterizuje jejich sušina.

Rozpouštědla a ředidla představují jen neaktivní složky laků, jsou však důležité při jejich přípravě. Z technologického hlediska je důležitá viskozita laků, která je závislá na obsahu filmotvorných složek, struktuře, molekulové hmotnosti, povaze makromolekul a obsahu rozpouštědel a ředitel.

Přeměna tekutých laků v tuhé látky je podmíněna v první řadě odstraněním prchavých podílů laků, což jsou rozpouštědla a ředidla. V druhé řadě filmotvorné složky mění svoji chemickou strukturu a pochody polymeračními, polykondenzačními, polyadičními a oxidací přecházejí v konečnou makromolekulární strukturu (schnutím, vypalováním).

V důsledku probíhajících strukturálních změn vytváří se na povrchu pevná, pružná vrstva, která má dobré elektroizolační vlastnosti s nepatrnou hygroskopičností.

2.2.1 Klasifikace laků

Impregnační laky se vyskytují ve dvou typech: rozpouštědlové a bezrozpouštědlové.

Rozpouštědlové laky jsou koloidní disperze filmotvorných látek v příslušných rozpouštědlech a ředidlech. Obsah filmotvorných látek (obsah sušiny) se pohybuje v rozmezí od 40 % do 60 %. Jsou to přírodní nebo syntetické pryskyřice a vysychavé rostlinné oleje. Ředidla a rozpouštědla jsou neaktivní složky laku, které při dalším zpracování beze zbytku vytěkají. Rozpouštědla mají dvojí úlohu: zaprvé vytvořit roztok z filmotvorných složek a zadruhé upravit tekutost laku tak, aby se dal aplikovat příslušnou technologií. Ředidla jsou častěji používána na ředění laků, protože jsou lacinější než rozpouštědla, ale většinou nejsou sama schopna rozpouštět filmotvorné složky.

Rozpouštědla a ředidla mají značný vliv na vytvoření celistvého a tvrdého lakového filmu. Souvisí to s jejich odpařováním. Molekuly ředidel a rozpouštědel difundují z vnitřních vrstev na povrch, kde se odpařují, přitom se lak zahušťuje nejen z důvodů poklesu koncentrace těkavých složek, ale i proto, že začínají zesíťovací chemické reakce filmotvorných složek, které se pak mění na gel a nakonec na tvrdý nerozpustný lakový film. Aby odpařování neprobíhalo příliš rychle, což by mohlo způsobit porušení celistvosti lakového filmu, tak se volí směs rozpouštědel složená z frakcí s různým bodem varu, takže odpařování probíhá rovnoměrně v určitém rozmezí teplot. Ideální případ nastane pokud by se nejprve odpařily všechny těkavé složky a až potom by měly začít chemické reakce, které by vedly k vytvrzení lakového filmu. Toto však prakticky nenastává, chemické reakce začínají většinou dříve, než se všechna rozpouštědla a ředidla odpaří. Z toho plyne důležitý poznatek, a to že každý lak má své rozpouštědlo i ředidlo, která se nemají zaměňovat jinými.

Vzhledem k tomu, že rozpouštědlové laky obsahují velký podíl těkavých látek, nelze nikdy dosáhnout dokonalého zaplnění impregnovaného prostoru. I když se provede impregnace vícenásobná, vždy zůstane nevyplněný prostor po odpařených ředidlech a rozpouštědlech.

Bezrozpouštědlové laky neobsahují ředidla ani rozpouštědla. Jsou složeny jen z filmotvorných látek, které se vytvrzují jen polymeračními reakcemi bez oddělování těkavých složek. Filmotvorné látky jsou ve většině případů syntetické pryskyřice - epoxidy, polyestery, polyuretany, silikony s různými modifikujícími látkami a tvrdidly, někdy také obsahují i monomery, které se označují jako reaktivní rozpouštědla (snižují viskozitu laku), avšak na rozdíl od neaktivních rozpouštědel reagují i s ostatními složkami a zabudovávají se do struktury lakového filmu. Bezrozpouštědlové laky jsou jednosložkové, dvousložkové nebo vícenosložkové. Jednosložkové obsahují síťovací činidla a do vícenosložkových laků se síťovací činidlo přimísí těsně před použitím. Po přidání síťovacího činidla (iniciátoru, tvrdidla,

katalyzátoru) jsou laky nestabilní a je nutné je v omezeném čase zpracovat. Jelikož neobsahují žádné těkavé látky, je obsah sušiny téměř 100 % a při jedné impregnaci se prakticky zaplní celý impregnovaný prostor. To je hlavní výhoda oproti lakům rozpouštědlovým. Další výhody jsou : lakový film nemůže být znehodnocen unikajícími parami rozpouštědla, kratší časy impregnačního procesu, není nebezpečí požáru. Mezi nevýhody patří: omezená doba skladovatelnosti i při snížených teplotách, citlivost na teplo, vlhkost, světlo v době skladování a vyšší cena, která ovšem v celkové kalkulaci může být vyvážena úsporami energie a pracnosti.

Do laků se také v malém množství přidávají sikativy či sušidla, ty zkracují doby schnutí 6 - 10 násobně. Jedná se o katalyzátory, jejichž účinnou složkou jsou kovy (Co, Mn, Pb aj.).

V dnešní době je bohatý sortiment impregnačních laků. Používají se zejména laky fenolické, polyvinylformálové, alkyd-fenolické, tereftalátové, polyesterové, epoxidové, polyuretanové, silikonové, polyamidové, polyimidové - všechny mohou být ještě různě modifikované, elektroizolační tmely, zalévací živice, polyuretanové dvojkomponentní, epoxidové dvojkomponentní, vytvrzující se při pokojové teplotě. Lepicí laky, epoxidové jednokomponentní se vytvrzující při zvýšené teplotě. V současnosti je vývoj impregnačních laků zaměřen na použití laků bezrozpouštědlových [5].

2.2.2 Rozdělení laků z hlediska jejich použití

Elektroizolační laky je možné dělit hlediska použití na:

1. laky na dráty,
2. impregnační laky (napouštěcí laky),
3. laky na tkaniny, izolační trubičky a papír,
4. povrchové laky,
5. lepicí laky.

2.2.3 Rozdělení laků z chemického hlediska

Podle chemické povahy filmotvorných složek se dělí laky na:

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

• Lihové laky

Alkoholické roztoky přírodních polymerů (kopály, šelaky). Používané přírodní pryskyřice mají většinou termoplastický charakter, proto laky nelze použít pro impregnaci vinutí.

• Olejové laky

Představují kombinaci přírodních nebo syntetických pryskyřic s vysychavými rostlinnými oleji (lněný, ricinový nebo dřevný). Prosychání laku není omezeno jen na odpaření rozpouštědel, nýbrž je závislé hlavně na vzdušné oxidaci, často i za zvýšených teplot.

• Laky na bázi syntetických pryskyřic a polymerů

Základní filmotvornou složku tvoří syntetické pryskyřice a vysokomolekulární polymery, které jsou často účelně modifikované (lakařské pryskyřice).

Používají se:

- laky na bázi termoplastických polymerů,
- silikonové laky,
- bakelitové laky,
- alkydové laky ,
- glyptály (glycerinfalátové polyestery),
- laky na bázi modifikovaných fenolových pryskyřic,
- bezrozpuštědlové laky - epoxidové, polyesterové, polyuretanové, silikonové.

2.2.4 Požadavky na laky

Impregnační laky musí splňovat požadavky funkční, technologické i ekonomické. Jsou to [5]:

- dobrá penetrace v krátkém čase
- co nejkratší doba vytvrzování
- prosýchání do hloubky
- tvrdost a současně i pružnost a houževnatost vytvrzené lakové vrstvy
- dokonalá lepivost v celém objemu vinutí
- nepřilíš vysoká teplota vytvrzování
- velmi dobré elektroizolační vlastnosti i po dlouhodobém působení vysoké vlhkosti
- malá navlhavost a nasákavost
- nesmí napadat kovy
- nesmí napadat lakovou izolaci na vodiči
- musí být odolné vůči teplému minerálnímu oleji
- musí být odolné proti chemikáliím (mazivům, chladivům, mýdlům)
- musí být odolné proti plísním

2.3 Slída s slídové výrobky

2.3.1 Slída

Slída je pro své vlastnosti dané její strukturou, v níž její stabilitu zajišťují silné kovalentní vazby kyslíku a křemíku ve vrstvách oxidu křemičitého, hlavním článkem izolačních materiálů. Patří mezi nejvíce používané izolanty, hlavně pro elektrické stroje, protože dovoluje větší tepelné i elektrické namáhání. Slída je přírodní minerál vyskytující se v přírodě v mnoha modifikacích. Je známo více než 30 druhů slídových minerálů. Nejčastěji tvoří nepravidelné krystaly s jednou rovinou souměrnosti. Jednotlivé dílčí vrstvy mají malou vzájemnou pevnost. Dle zpracování můžeme slídu rozdělit na surovou, štípanou, slídový prach a upravenou (remiku). Její struktura umožňuje výbornou

štípatelnost a lze dosáhnout slídových plátek o tloušťce až 0,005 mm. Pro elektrotechnická zařízení jsou nejdůležitějšími druhy slídy muskovit a flogopit [6].

- Muskovit – je to tzv. draselná slída – kyselý křemičitan hlinitodraselný. Čistý muskovit je bezbarvý. Pokud obsahuje příměsi, tak může být mírně růžový, hnědý nebo zelený podle toho jaké oxidy obsahuje. Je dokonale štípatelný, ohebný, mechanicky pevný a použitelný do teplot 500 až 600 °C.
- Flogopit – je to tzv. hořečnatá slída – kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý. Bývá zabarven jantarově žlutě až tmavohnědě. Barva se opět dle příměsí mění. Na rozdíl od muskovitu má nižší elektrickou vodivost a větší tepelnou stálost. Používá se do teploty 800 °C.

2.3.2 Slídové výrobky

Izolační systémy na bázi slídy můžeme rozdělit do dvou základních skupin na mikanity a materiály z rekonstruované slídy (remikanity). V mikanitech je slída aplikována v základní formě slídových lístků (krystalů), remikanit je slída v rekonstruované formě, ve formě tzv. slídového papíru. Pro tyto materiály je podkladovým materiálem papír, v dnešní době většinou skleněná tkanina. Jako pojivo pro vrstvené izolanty se používají organické a anorganické materiály, proces většinou probíhá za zvýšených teplot a tlaku. Jako tradiční materiály šelak a asphalt, jako moderní se používají epoxidy, polyestery, plasty aj. Z novodobých izolačních systémů se nejvíce osvědčila pojiva bezrozpuštědlová, a to epoxidy, silikony a nenasycené polyestery.

Mikanity (komutátorové) jsou deskové slídové izolanty, které se vyrábějí vrstvením a lepením slídových plátek, jako pojivo se nejčastěji používá šelak. Komponenty se lisují za zvýšené teploty a tlaku do tvrdých kompaktních desek. Používá se jako mezilamelová izolace komutátorů. Ohebný mikanit s větším obsahem pojiva se vyrábí v deskách a má pojivla vytvrzená jen částečně, aby se mohly desky lépe lisovat a tvarovat. Za normální teploty je to ohebný a tvárný materiál. Vnitřní vrstva je tvořena slídovým papírem, který oboustranně obklopuje vrstvu slídových lístků, na nichž je z každé strany skleněná tkanina.

Mezi materiály z rekonstruované slídy patří dnes už rozsáhlá skupina materiálů sestávajících z nosného (podkladového) materiálu, slídového papíru a pojiva. Ve všech vrstvených výrobcích, tzv. remice, je stejnoměrné rozložení pojiva, tím se dosáhne rovnoměrná tloušťka a dobré elektrické vlastnosti. V porovnání s mikanity stejné tloušťky je materiál hutnější, rovnoměrnější a obsahuje méně vlhkosti a vzduchových bublin. Pro

mezilamelovou izolaci komutátorů se používá materiál složený ze slídového papíru a epoxidového pojiva, který se zpracovává lisováním do formy tvrdých kompaktních desek broušených na předepsanou tloušťku. Pro prokládání vodičů a elektrické stroje se používá materiál vzniklý slisováním slídového papíru s epoxidovým pojivem do formy tvrdých kompaktních desek, ty nejsou broušeny na předepsanou tloušťku. Podobná forma vzniká i s anorganickým pojivem.

2.4 Kompozity

Kompozity jsou složené materiály, které představují směsnou soustavu tvořenou makroskopickými útvary dvou či více materiálových složek. Složeným materiálem lze nazvat takovou soustavu, která vyhovuje těmto kritériím[7]:

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

Ke složeným materiálům nepatří přírodní materiály, jako např. dřevo, i když mají charakter složené soustavy. Složené materiály se používají místo jednoduchých kvůli dosažení některého z následujících hledisek: [7]

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

Vlastnosti složených materiálů jsou závislé na vlastnostech materiálů složek. Výrazně jsou ovlivňovány množstvím jednotlivých složek v soustavě, geometrickým tvarem částic

složek, jejich orientací, uspořádáním a rozložením v soustavě. Podstatný vliv na mechanické vlastnosti mají případné chemické či fyzikální pochody na hranicích složek.

2.4.1 Permittivita složené soustavy

Nejčastěji se řeší soustavy dvousložkové. Pro jejich permitivitu byla v minulosti odvozena řada směsných vztahů. Velká část vztahů je si formálně podobná. Liší se od obecného tvaru směsného vztahu pouze mírou odpovídající použité aproximace.

Většina směsných vztahů popisuje matriční soustavy s matričním prostředím o permitivitě ε_2' a dispergovanými částicemi kulového tvaru o permitivitě ε_1' . Při odvození vztahu se uvažuje, že každá dispergovaná částice je obklopena prostředím o efektivní permitivitě $\varepsilon_{ef}' < \varepsilon_2'$; $\varepsilon_s' >$.

Nejvhodnější je pracovat se středními prostorovými hodnotami elektrické indukce a intenzity elektrického pole. Vychází-li se z těchto středních hodnot, lze pro případ částic kulového tvaru vyjádřit permitivitu soustavy ε_s' výrazem:

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_2'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_{ef}'}{\varepsilon_2'} \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_{ef}'}, \quad (21)$$

Aproximativní přístup k výpočtu permitivity ε_s' vychází z dosazení $\varepsilon_{ef}' = \varepsilon_2'$ nebo $\varepsilon_{ef}' = \varepsilon_s'$ do rovnice (21), důsledkem toho neodpovídá v obecném případě skutečnosti.

Maxwellův směsný vztah:

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_2'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'}, \quad (22)$$

Maxwell zkoumal vnitřní konduktivitu a pro případ matriční soustavy s nízkou koncentrací dispergovaných částic tvaru stejných koulí použil přístupu dosazení $\varepsilon_{ef}' = \varepsilon_2'$, tím odvodil dodnes používaný směsný vztah (22).

Böttcherův směsný vztah:

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_s'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_s'}, \quad (23)$$

Tento vztah pro soustavu s kulovými částicemi vychází z aproximace $\varepsilon_{ef}' = \varepsilon_s'$.

Lichteneckerův mocninový směsný vztah:

$$\varepsilon_s'^k = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i'^k, \quad (24)$$

pro případ dvousložkové soustavy je ve tvaru:

$$\varepsilon_i'^k = v_1 \varepsilon_2'^k + v_2 \varepsilon_2'^k, \quad (25)$$

Vztah obsahuje empirický parametr k , který je závislý zejména na tvaru a orientaci částic složené soustavy. Může nabývat jakékoliv hodnoty v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$. Pro krajní hodnoty parametru k odpovídá rovnice (25) vztahům:

$$\text{pro } k = 1 \quad \varepsilon_i' = v_1 \varepsilon_2' + v_2 \varepsilon_2', \quad (26)$$

a

$$\text{pro } k = -1 \quad \frac{1}{\varepsilon_i'} = v_1 \frac{1}{\varepsilon_2'} + v_2 \frac{1}{\varepsilon_2'}, \quad (27)$$

které popisují permitivitu soustavy složené ze dvou paralelně nebo sériově řazených vrstev. Pro hodnotu $k \rightarrow 0$ přechází rovnice v tzv. Lichteneckerův logaritmický vztah:

$$\log \varepsilon_i' = v_1 \log \varepsilon_2' + v_2 \log \varepsilon_2', \quad (28)$$

Lichteneckerův logaritmický vztah dobře popisuje složené soustavy statistického i matričního typu s libovolnou hodnotou poměrného objemového dílu všech složek soustavy obsahující částice libovolného či neurčitého tvaru při chaotickém uspořádání složek. Čím menší bude poměr permitivit obou složek, tím přesnější bude popis dvousložkové složené soustavy vztahem (28). Při odvozování těchto vztahů uvažoval Lichtenecker dvě složky o nejvyšším poměru $\frac{\epsilon_1'}{\epsilon_2'} = 4$ [7].

2.5 Dielektrická relaxační spektroskopie

2.5.1 Princip dielektrické relaxační spektroskopie

Spektroskopie je obor zahrnující všechny metody studia látek založené na interakci mezi elektromagnetickým polem a atomy nebo molekulami měřených látek v kapalném, plynném nebo pevném stavu.

K diagnostice vlastností materiálů je možno použít mnoha nedestruktivních i destruktivních metod. Jednou z nových diagnostických metod pro diagnostiku různých izolačních systémů je metoda DRS. Je to jedna z nedestruktivních metod, kterou lze použít ke studiu různých materiálových soustav. DRS je metoda na rozhraní fyziky, chemie a materiálového inženýrství. Princip spočívá ve sledování odezvy elektrického dipólu na působení vnějšího elektrického pole. Používá se ve frekvenční a časové oblasti.

Studovaný materiál plní funkci dielektrika, které je vloženo do vnějšího stejnosměrného elektrického pole. V časové oblasti se sledují nabíjecí a vybíjecí proudy kondenzátoru. Ve frekvenční oblasti se dielektrická relaxační spektroskopie realizuje měřením kmitočtové závislosti reálné a imaginární složky impedance studovaného vzorku. Po vyloučení rozměrů vzorků sledujeme složky komplexní permitivity. Na základě změny kmitočtu v definovaném pásmu se sledují odezvy (polarizace) částic. Pro posouzení vlastností zkoumaného materiálu (v našem případě laku) je nutné sledovat jeho chování při různých vlhkostech.

Pro matematický popis jevu polarizace je nejvhodnější polární dielektrikum, ve kterém jsou jednotlivé dipóly zcela volné a mohou se po přiložení vnějšího elektrického pole otáčet do jeho směru, aniž by se vzájemně ovlivňovaly. Jako příklad můžeme vzít např. silně zředěný roztok polární látky v nepolárním rozpouštědle. Jednotlivé polární molekuly, které nesou elektrické dipóly, zodpovídají za vznik polarizace. Jelikož jsou od sebe vzdáleny, tak se navzájem neovlivňují. Chování takového dielektrika se řídí kinetickou reakcí I. řádu.

Pro časový průběh polarizace platí:

$$\frac{dP(t)}{dt} = konst \cdot (P_s - P(t)), \quad (29)$$

kde $P(t)$ je okamžitá hodnota polarizace a P_s je ustálená hodnota polarizace, tj. polarizace v časech značně vzdálených od okamžiku připojení vnějšího elektrického pole. Uvedená rovnice vyjadřuje, že rychlost nárůstu polarizace je přímo úměrná rozdílu mezi ustálenou a okamžitou hodnotou polarizace [8].

2.5.2 Empirické funkce rozložení relaxačních dob

Dielektrickou relaxaci lze popsat několika různými empirickými funkcemi. Tvary jednotlivých rozdělení, které byly při experimentálním studiu dielektrické relaxace pozorovány, jsou v různých systémech až na výjimky podobné, a proto bylo předloženo několik různých empirických funkcí. Vycházejí z experimentálně zjištěných průběhů vybíjecího či nabíjecího proudu v závislosti na čase anebo složek komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu. Proto byly některé funkce navrženy v časové oblasti a jim odpovídající funkce v kmitočtové oblasti byly odvozeny pomocí transformačního vztahu nebo byl empiricky odvozen výraz v kmitočtové oblasti. Všechny tyto funkce obsahují několik parametrů, jejichž závislost na vnějších faktorech je předmětem zkoumání. Mezi ně patří teplota, intenzita elektrického pole, tlak a jiné.

Coleho – Coleho (C-C) rozdělení

Komplexní permitivita je dána vztahem :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}}, \quad (30)$$

kde α vyjadřuje šířku rozdělení relaxačních dob (čím vyšší α , tím je rozdělení širší), τ_0 udává polohu relaxace na časové či kmitočtové ose, ε_s je statická relativní permitivita (při $\omega = 0$), ε_∞ je optická relativní permitivita (při $\omega \rightarrow \infty$). V komplexní rovině je grafem této

funkce úsek kružnice se středem pod reálnou osou protínající ji v bodech ε_∞ a ε_s . Viz. obr. 2.4.

U mnoha reálných dielektrik není výše zmíněná závislost popsána částí kruhového oblouku, protože křivka vykazuje jistou nesymetrii. Z toho důvodu upravili Havriliak a Negami Coleho - Coleho vztah zavedením činitele β .

Havriliakovo – Negamiho (H-N) rozdělení

Toto rozdělení vzniklo na základě vyhodnocení rozsáhlého souboru experimentálních dat a kombinací C-C a C-D rozložení relaxačních dob.

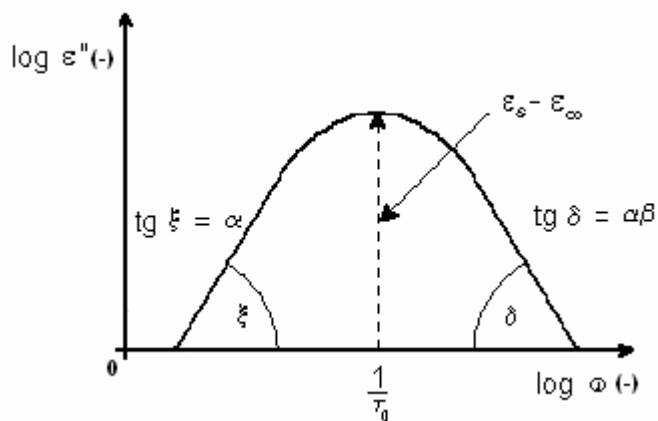
Pro komplexní permitivitu platí vztah:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}]^\beta}, \quad (31)$$

kde β je činitel, který charakterizuje asymetrii.

H-N rozdělení vystihuje řadu experimentálních souborů dat lépe než C-C a C-D, protože obsahuje čtyři nezávislé volitelné parametry $(\alpha, \beta, (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty), \tau_0)$, zatímco v C-C i C-D rozdělení jsou tyto nezávislé parametry pouze tři. Zvyšování počtu parametrů sice vede ke zlepšení shody příslušné funkční závislosti s experimentem, ale není však zárukou dokonalejší fyzikální interpretace experimentálních dat.

Významnou vlastností tohoto rozdělení je, že v logaritmických souřadnicích je závislost $\varepsilon''(\omega)$ tvořena dvěma přímkami se směrnici α pro $\omega \ll \frac{1}{\tau_0}$ a $\alpha\beta$ pro $\omega \gg \frac{1}{\tau_0}$. Parametry α a β mají názornou geometrickou interpretaci. H-N rozdělení se často používá pro popis relaxace [8].



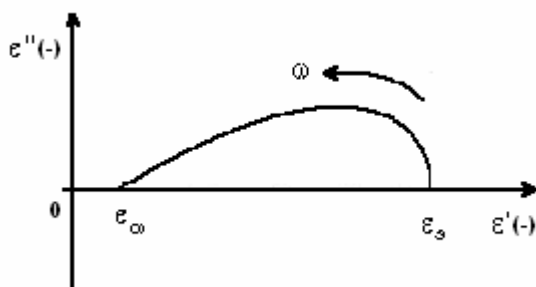
Obr. 2.5: Havriliakovo – Negamiho rozdělení v souřadném systému log/log [9]

Coleho – Davidsonovo (C-D) rozdělení

Pro komplexní permitivitu platí vztah:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau_0)^{\beta}}, \quad (32)$$

kde β je činitel, který charakterizuje rozdělení relaxačních dob. V komplexní rovině je tato funkce zobrazena jako deformovaná polokružnice, která je zploštělá v oblasti vysokých kmitočtů.



Obr. 2.6: Coleho-Davidsonův diagram s jedním distribučním parametrem [6]

2.6 Stárnutí dielektrických materiálů

2.6.1 Činitelé stárnutí dielektrických materiálů

Stárnutí je souhrn fyzikálních a chemických změn, k nimž dochází v závislosti na čase komplexním působením vlivů a podmínek, jimž je izolace vystavena. Projevem stárnutí je postupné znehodnocování materiálů, provázené trvalým zhoršením jejich funkčních vlastností. Mezi činitele způsobující změny vlastností organických izolantů, patří zejména [10]:

- teplota
- vzdušný kyslík
- mechanická namáhání
- elektrické pole
- klimatické vlivy
- chemické vlivy
- ultrafialové záření aj.

Obvykle působí několik činitelů současně.

Na stárnutí závisí doba života izolačního systému a tím i doba života elektrického zařízení vzhledem k jeho spolehlivosti a bezpečnosti v provozu a ekonomické využití materiálu a práce. Dobou života se rozumí doba, po kterou je určitý výrobek schopen konat normální funkci. Pokud máme na mysli celý soubor výrobků, mluvíme o životnosti. Změny vlastností izolantů mohou být buď vratné nebo nevratné. Vratné změny jsou charakteru fyzikálního, např. navlhnutí. Izolant v těchto případech nabude opět původních vlastností, pokud přestanou působit vlivy, které změnu vyvolaly (např. po vysušení materiálu). Nevratné změny vznikají následkem složitých fyzikálně chemických pochodů, kdy dochází k strukturálním změnám, provázeným trvalým zhoršením mechanických, elektrických a jiných vlastností.

2.6.2 Navlhavost a nasákavost látek

Navlhavost materiálu souvisí s přijímáním vlhkosti z okolního prostředí. Jedná se o dlouhodobý proces, při kterém se v látce, uložené v prostředí o dané stálé relativní vlhkosti a stálé teplotě, zvyšuje postupně počáteční obsah vlhkosti v jednotkovém objemu látky a asymptoticky se blíží k rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá relativní vlhkosti prostředí. Základním fyzikálním dějem je adsorpce molekul vody. Adsorpce se uplatňuje hlavně na povrchu látky, kde se molekuly vody usazují. Současně mohou pronikat do materiálu. Pak mluvíme o absorpci. Pokud nevíme, o který z obou jevů se jedná, tak používáme označení sorpce. Mezi základní adsorpční síly řadíme elektrostatické, van der Waalsovy a chemické. Elektrostatické síly jsou velké mezi vodou a látkou, která má dipólový charakter. Van der Waalsovy síly se uplatňují ve všech případech. Chemické síly se uplatňují při tzv. chemisorpci.

Nasákavost materiálu souvisí s přijímáním vody izolantem, pokud je v ní ponořen. Základním fyzikálním dějem při sorpci vody je adheze. Uplatňuje se na povrchu látky i v jejích pórech. Adheze vody k povrchu tuhých látek je důsledkem působení přitažlivých sil mezi molekulami vody a látky v povrchových vrstvách. Nasákavost izolantu, který přijal vodu s níž byl ve styku, je definována jako množství vody, které izolant pohltil až do nasycení. Je vyjádřena v procentech hmotnosti suchého materiálu. Nasákavost látky je dána množstvím vody, která je obsažena v jednotkovém objemu látky ve stavu nasycení při bezprostředním styku kapalné vody s látkou. Podle ČSN 64 0112 se určí nasákavost máčením látky po určitou dobu (do stavu nasycení) ve vodě o normální teplotě. Nasákavost je u všech izolantů větší než navlhavost.

Určováním navlhavosti a nasákavosti izolantů charakterizujeme sice materiál s ohledem na jeho tendenci přijímat vodu, ale neklasifikujeme však míru změn jeho elektrických vlastností, k nimž působením vlhkostí dochází. Tyto změny lze hodnotit pouze zjištěním elektrických vlastností po navlhnutí.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Zkušební vzorky

Charakteristika laku

Impregnační lak TSA 220S je jednosložková čirá epoxidová pryskyřice jantarové barvy. Vyznačuje se výchozí viskozitou 5000 mPa.s při 25 °C a po zahřátí strmým poklesem viskozity. Při 50 °C vykazuje hodnotu 500 mPa.s. Předností TSA 220S je podstatné zjednodušení technologického procesu VPI. Impregnant není třeba před aplikací přehřát. Žádoucí pokles viskozity a tím penetrační schopnost je docílena aplikací na přehřátý impregnovaný objekt. Pryskyřice je určena pro VPI aplikace pro trakční motory, kde je vyžadována teplotní třída C s mezní teplotou 220 °C.

Tab. 3.1: Charakteristiky zpracování TSA220S [11]

Veličina	Pryskyřice	Poznámka
Viskozita	5000	mPa.s při 25 °C
	500	mPa.s při 50 °C
Hustota	1,18	g.cm^{-3}
Poměr ve směsi	Jednosložková pryskyřice	
Doba gelovatění	6 minut	při 165 °C
Doba potřebná pro vytvrzení	12 hodin	při 165 °C

Tab. 3.2: Vlastnosti tvrzené pryskyřice [11]

tvrdost D podle Shorea	(DIN 53505)	92 (25 °C)
tepelná třída	(ASTM D1207/20000hod.)	220 °C
tepelná zesklennění	(IEC 1006)	150 °C
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)	0,21W.mK ⁻¹
zápalnost	(UL 94)	--
absorpce vody	(ISO 62)	0,12 % (23 °C)
dielektrická pevnost	(IEC 243-1)	260 kV.cm ⁻¹
dielektrická konstanta	(IEC 250)	3,6 při 20 °C
ztrátový činitel	(IEC 250)	0,003 při 20 °C
měrný (objemový) odpor	(IEC 93)	10 ¹³ Ω.cm ⁻¹

Charakteristika slídy

Mletá slída 60.030 je nerostná surovina vyrobená mletím slídy nebo slídových odpadů (muskovit) na velikost částic 0,25 mm nebo 0,80 mm. Mletá slída neobsahuje vodivé částice ani organických příměsí.

Tab. 3.3: Technické údaje slídy [12]

Velikost částic	mm	0,25	0,80
Obsah vlhkosti	%	max. 3	max. 3
Obsah železných částic	%	max. 0,002	max. 0,002

Odmagnetovaná mletá slída se používá jako plnivo v elektrotechnickém průmyslu. Její skladovatelnost je za normálních podmínek prakticky neomezená.

Odlévání a příprava zkušebních vzorků

Experimentální vzorky byly odlévány odměřeným množstvím směsi laku a mleté slídy do teflonových (PTFE) forem s následným vytvrzením v elektrické peci. Formy měly tvar rotačního komolého kužele. Pro přesnější nanášení byla použita injekční stříkačka. Po vytvrzení se objevil problém s vyjímáním vzorků z forem. Některé vzorky byly deformované, což je na závadu pro měření, poněvadž se mezi vzorkem a elektrodami vytváří vzduchové mezery. Pro snadnější vyjímání byly použity dvoudílné teflonové formy, které byly spojeny osmi šrouby. U tohoto způsobu bylo nutné dostatečně dotáhnout všechny šrouby, aby nedocházelo k zatékání laku mezi obě části. V tom samém případě byly vzorky nevyhovující z důvodu velké tloušťky. Pokud se použilo menší množství laku, tak bylo prohnutí vytvrzeného laku větší než v případě jednodílných forem. Z dalších pokusů odlévání bylo zjištěno, že jako nejlepší varianta je nabrat o něco větší množství laku a vstříkovat jej do jednodílných forem. Větší množství zajistí přilnutí laku kolem okraje a tím se zmenšení prohnutí při vytvrzování. Tato varianta se jeví jako vyhovující zadání.

Podmínky vytvrzování byly zvoleny v souladu se zadáním diplomové práce a s materiálovým listem zkoumaného elektroizolačního laku. Lak byl ponechán v elektrické peci po dobu 12 hodin při teplotě 165 °C.

Po vyjmutí byly vzorky prohnuté a za účelem odstranění sériových parazitních vzduchových kapacit při dielektrických měřeních bylo nutné tyto nerovnosti odstranit. Vzorky byly broušeny smirkový papírem různé hrubosti. Nejprve papírem s velkou hrubostí pro rychlejší odběr laku a pak dobroušením jemnějším. Postupné odebírání nerovností je vidět na obr. 3.1. Vzorky byly připraveny v laboratořích Ústavu elektrotechnologie.



Obr. 3.1: Postupné broušení vzorků

Pro přesné stanovení tloušťky vzorků byl použit mikrometr. Tloušťka byla měřena na deseti různých místech každého vzorku. Takto získané hodnoty byly statisticky vyhodnoceny určením průměrné hodnoty. K určení hmotnosti byly použity elektronické laboratorní váhy WPS 360/C/2, které jsou výrobcem určeny pro přesné a rychlé vážení. Rozlišovací schopnost vah je 1 mg.

Pro zkušební experiment bylo vyrobeno třicet vzorků s různým hmotnostním procentem plnění mletou slídou. Každá sada obsahovala 6 vzorků. Byly plněny slídou o zastoupení nula, čtyři, osm, dvanáct a šestnáct hmotnostních procent. Pro lepší promíchání byla kádinka s lakem a slídou vložena dvakrát na pět minut do ultrazvuku. Vzorky byly vždy označeny pořadovým číslem v sadě a procentuálním plněním. Přehled vzorků je uveden v tabulkách 3.4 a 3.5.

Tab. 3.4: Přehled vzorků část 1.

Vzorek č. [-]	Plnění [%]	Tloušťka [mm]	Hmotnost [g]
1	0	2,500	8,589
2		3,200	11,660
3		2,550	9,224
4		3,200	11,466
5		2,600	9,685
6		2,700	9,994
1	4	2,500	9,179
2		2,700	9,501
3		2,350	8,492
4		2,100	7,838
5		2,000	7,374
6		2,400	8,835
1	8	3,000	10,986
2		2,500	8,931
3		2,650	9,812
4		2,900	11,045
5		2,600	9,510
6		2,500	9,110

Tab. 3.5: Přehled vzorků část 2.

Vzorek č. [-]	Plnění [%]	Tloušťka [mm]	Hmotnost [g]
1	12	2,250	8,162
2		2,300	9,197
3		3,200	11,819
4		2,600	9,540
5		2,850	11,021
6		2,800	10,741
1	16	2,200	8,431
2		3,300	13,184
3		2,700	10,189
4		3,200	12,668
5		2,850	10,452
6		2,800	10,762

Navlhávání zkušebních vzorků

Dielektrické vlastnosti zkušebních vzorků byly zkoumány v průběhu postupného navlhávání. Veškerá měření se uskutečnila v prostředí s průměrnou teplotou 23 °C a při relativní vlhkosti vzduchu 35 – 45 %. Vzorky byly nejprve vystaveny prostředí o relativní vlhkosti 0 %. Pro tento účel posloužil exsikátor s regenerovaným molekulovým sítem. Experiment byl dlouhodobého charakteru a v každém prostředí byly vzorky exponovány po dobu jednoho týdnu. Vysušené vzorky byly postupně změřeny zvolenou metodikou. Poté byly vloženy do exsikátoru s nasyceným roztokem $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ve kterém byla relativní vlhkost 33 %. Další prostředí byla volena s vlhkostmi 55 % (nasycený roztok $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 75 % (nasycený roztok NaCl) a 93 % (nasycený roztok KNO_3). Nakonec byly vzorky vloženy do exsikátoru s regenerovaným molekulovým sítem pro referenční měření.

3.2 Zkušební zařízení

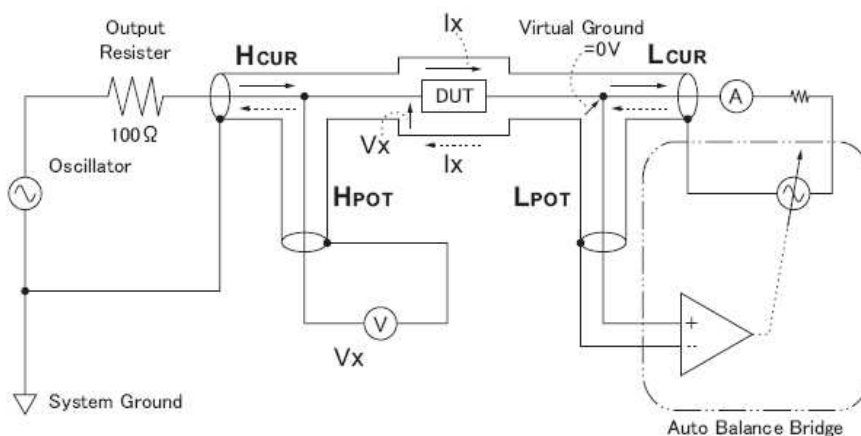
3.2.1 Měřicí zařízení

Složky komplexní permitivity byly v kmitočtové závislosti měřeny přesným RLC metrem HP E4980A. Zařízení využívá k měření mostovou metodu s automatickým vyvažováním.



Obr. 3.2: HP E4980A

Zapojení je uvedeno na obr. 3.3, celé měření je zautomatizováno pomocí operačního zesilovače, který řídí oscilátor v pravé větvi zapojení tak, aby byl součet proudů v obou větvích zapojení roven nule. Požadovaný měřicí kmitočet s danou velikostí amplitudy je nastavován na oscilátoru v levé větvi zapojení.



Obr. 3.3: Princip měření se čtyřvodičovým vedením [13]

Kmitočtový rozsah přístroje HP E4980A umožňuje měřit kapacitu C_X a ztrátový činitel $tg\delta$ při kmitočtech od 20 Hz do 2 MHz. Přístroj je propojen s osobním počítačem přes rozhraní GPIB, které slouží k ovládní a měření na HP E4980A. Všechna nastavení a ovládní měřicího procesu jsou plně automatizována. Ovládací software ukládá naměřená data přímo do tabulkového softwaru Microsoft Excel a také v něm jsou všechna data zpracovávána.

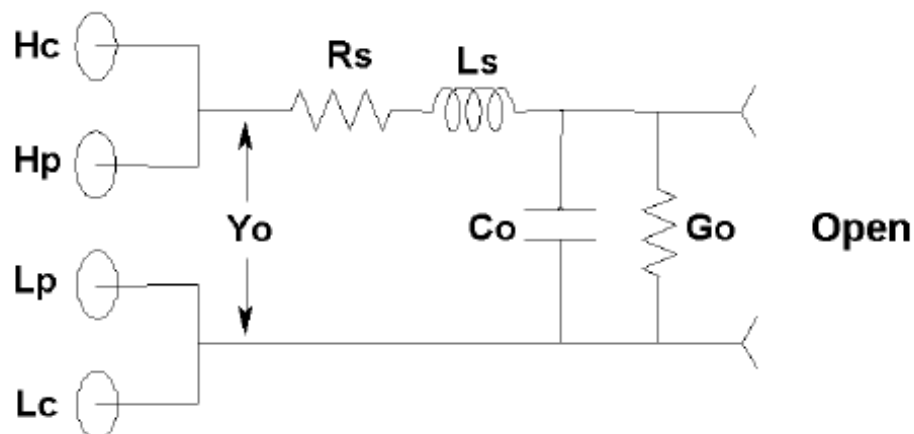
Při měření je nutné nastavit předepsané korekce. Přístroj je vybaven možností nastavení korekcí označených jako OPEN, SHORT, LOAD a délky vodičů, které slouží k přesnému nastavení počátečního stavu elektrodového systému. Korekce LOAD slouží pouze pro předem definované kmitočty a při měření nebyla využita. Před každým měřením je nutné provést kalibraci, při které přístroj měří rozptylovou admitanci (korekce OPEN) a zbytkovou impedanci (korekce SHORT). Bez použití korekcí by byly do výsledků měření zahrnuty veškeré nežádoucí parazitní vlivy, které výsledek měření zkreslují. Elektrodový systém je připojen čtyřvodičovým vedením. Konektory jsou označeny písmeny H_{Cur} , H_{Pot} (pro napěťovou elektrodu) a L_{Cur} , L_{Pot} (pro měřicí elektrodu) [14].

Korekce OPEN

Korekce OPEN (naprázdno) slouží k eliminaci parazitní kapacity C_P (Na obr. 3.4 a v rovnici (33) je označena jako C_0) mezi vodiči měřicího zařízení a elektrodového systému. Pro její nastavení se používá speciální kalibrační elektroda s izolační krytkou, která od sebe oddělí elektrody elektrodového systému. Přístroj poté změří rozptylovou admitanci Y_0 , kterou lze vyjádřit vztahem:

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0, \quad (33)$$

kde G_0 je parazitní vodivost mezi vodiči propojení. Popsaná situace je znázorněna na obr. 3.4. R_s je parazitní impedance vodičů a L_s je parazitní indukčnost vodičů.



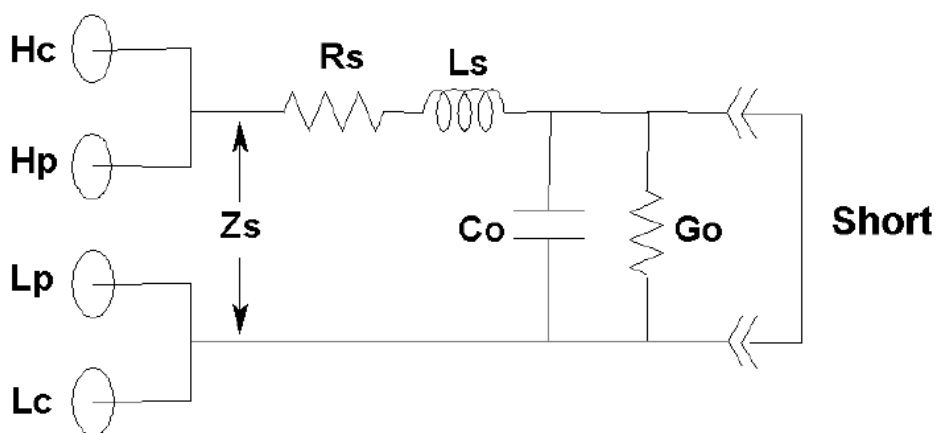
Obr. 3.4: Schéma zapojení při měření rozptylové admitance Y_0 [14]

Korekce SHORT

Korekce SHORT (nakrátko) slouží k eliminaci parazitní impedance R_S vodičů propojení měřicího zařízení a elektrodového systému. Pro její nastavení se používá speciální kalibrační elektroda, která zkratuje napěťovou a měřicí elektrodu elektrodového systému. Přístroj poté změří ztrátovou impedanci Z_S , kterou lze vyjádřit vztahem:

$$Z_S = R_S + j\omega L_S, \quad (34)$$

Popsaná situace je znázorněna na obr. 3.5. Ztrátová impedance Z_S představuje odpor svorek, konektorů a pájených spojů.



Obr. 3.5: Schéma zapojení při měření ztrátové impedance Z_S [14]

Hodnoty rozptylové admitance Y_0 a ztrátové impedance Z_S , získané při provedení korekcí OPEN a SHORT se uloží do paměti měřicího přístroje. Při měření je v hodnotě změřené impedance Z_m , kromě impedance zkušební vzorku Z_{VZ} , obsažena i rozptylová admitance Y_0 a ztrátová impedance Z_S . Velikost změřené impedance vyjadřuje rovnice [9]:

$$Z_m = Z_S + \frac{\frac{1}{Y_0} \cdot Z_{VZ}}{\frac{1}{Y_0} + Z_{VZ}}, \quad (35)$$

Vzhledem k tomu, že jsou hodnoty parazitních prvků známy, lze algebraickou úpravou předchozího výrazu vyjádřit skutečnou hodnotu impedance vzorku, pro kterou platí výraz:

$$Z_{VZ} = \frac{\frac{1}{Y_0} \cdot (Z_m - Z_S)}{Z_S - Z_m + \frac{1}{Y_0}} = \frac{Z_m - Z_S}{1 + (Z_S - Z_m) \cdot Y_0}, \quad (36)$$

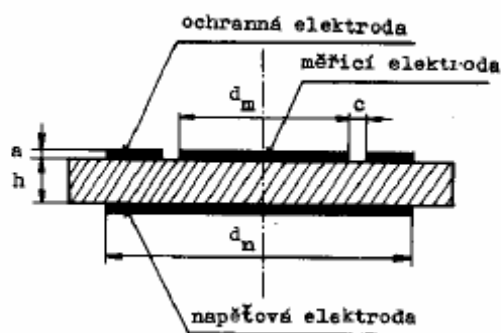
3.2.2 Elektrodový systém

Pro měření složek komplexní permitivity zkušebních vzorků v kmitočtové oblasti byl použit přesný LCR-metr firmy Hewlett Packard HP E4980A, který využívá tříelektrodový rovinný systém Agilent 16451B. Teplotní rozsah použití uvedeného elektrodového systému se pohybuje od - 40 °C do + 70 °C.



Obr. 3.6: Tříelektrodový systém 16451B

Daný elektrodový systém se používá pro měření elektrických vlastností rovinných vzorků při měření stejnosměrným, jakož i střídavým elektrickým polem na mostech do kmitočtu cca 10^6 Hz. Tříelektrodový rovinný systém je tvořen napěťovou a měřicí elektrodou kruhového tvaru a ochrannou elektrodou ve tvaru mezikruží. Použití ochranné elektrody snižuje vliv okrajové a zemní kapacity měřicí elektrody a vylučuje vliv povrchového svodu na výsledek měření. Účinnost ochranné elektrody je tím větší, čím menší je rozdíl potenciálů a mezera mezi měřicí a ochrannou elektrodou. Základní uspořádání systému je znázorněn na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Tříelektrodový systém [1]

Pro rozměry elektrodového systému platí doporučení normy. Šířka ochranné elektrody nesmí být menší než dvojnásobek tloušťky vzorku a mezera mezi měřicí a ochrannou elektrodou má být co nejmenší ($c \leq 2h$). Šířka ochranné elektrody má být minimálně 10 mm a šířka mezery 1 až 2 mm. Průměr napěťové elektrody nesmí být menší než vnější průměr ochranné elektrody.

Pro výpočet relativní permitivity platí:

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (37)$$

kde C_x je kapacita měřeného kondenzátoru s vloženým dielektrikem (naměřená hodnota),

C_0 je geometrická kapacita, tj. geometricky shodného měřicího systému, u něhož je místo původního dielektrika vakuum (vypočtená hodnota z rozměrů kondenzátoru).

Pro geometrickou kapacitu tříelektrodového systému platí vztah:

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S_{ef}}{h}, \quad (38)$$

kde h je tloušťka vzorku a S_{ef} je efektivní plocha měřicí elektrody, pro niž platí:

$$S_{ef} = \pi \frac{(d_m + Bc)^2}{4}, \quad (39)$$

kde d_m je průměr měřicí elektrody, c je šířka vzduchové mezery mezi ochrannou a měřicí elektrodou, B je součinitel, který je pro $a < h$ roven jedné a pro $a \ll h$ se počítá ze vztahu:

$$B = 1 - 2,932 \frac{h}{c} \log \cos\left(0,7854 \frac{c}{h}\right), \quad (40)$$

3.3 Postup měření experimentu

Při experimentu byl sledován vliv dlouhodobého navlhávání laku TSA220S na kmitočtové průběhy složek komplexní permitivity. Vzorky byly proměřovány RLC-metrem HP E4980A propojeným s výše popsaným tříelektrodovým systémem. Tento přístroj bylo nutno zapnout 30 minut před vlastním měřením z důvodu vyhřátí a ustálení na provozní teplotu. Jednotlivé vzorky byly postupně vyjímány z exsikátoru a ihned vkládány do tříelektrodového systému.

V ovládacím programu byl nastaven požadovaný kmitočtový rozsah měření od 50 Hz do 2 MHz, počet změřených hodnot na dekádu byl 10. Po spuštění probíhal proces měření automatizovaně a změřené hodnoty byly vyhodnocovány a ukládány do počítače ve formě tabulky programu MS Excel. Měření kmitočtové závislosti probíhalo v souladu se zadáním práce při relativních vlhkostech 0, 33, 55, 75 a 93 %.

Po vyjmutí z elektrodového systému byl vzorek vložen do exsikátoru s následnou vlhkostí. Expozice vzorků v dané vlhkosti trvala jeden týden a poté byly všechny vzorky proměřeny. Poslední dvě měření probíhala po uplynutí jednoho a tří týdnů, kdy vzorky byly umístěny v exsikátoru s molekulovým sítem, tzn. v prostředí s 0 % relativní vlhkostí vzduchu.

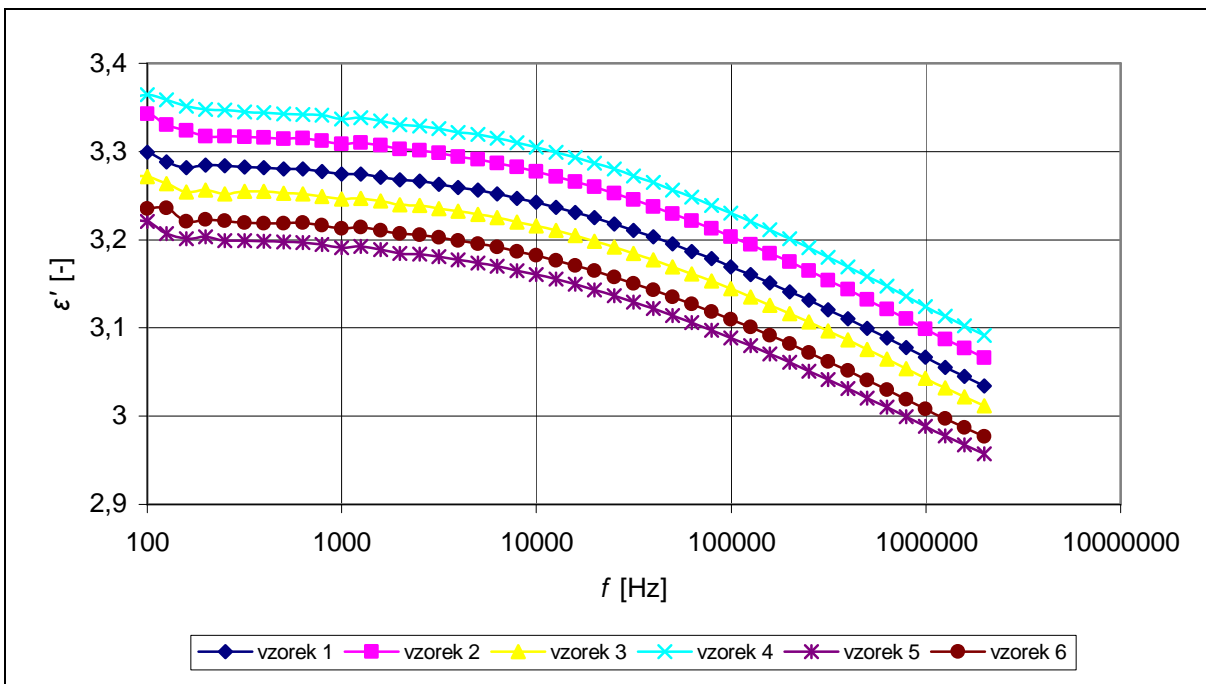
Vzorky laků byly broušeny, přesto vykazovaly na povrchu jisté nerovnosti, které znemožňovaly dokonalé přilehnutí vzorku a elektrod. To mělo za následek vznik nedefinovaných vzduchových mezer mezi povrchem vzorku a elektrodou. Při měření se mezery projevují jako sériově řazený kondenzátor. Pro zajištění stejných podmínek uložení při měření byly vzorky po prvním vložení do elektrodového systému označeny.

3.4 Výsledky měření

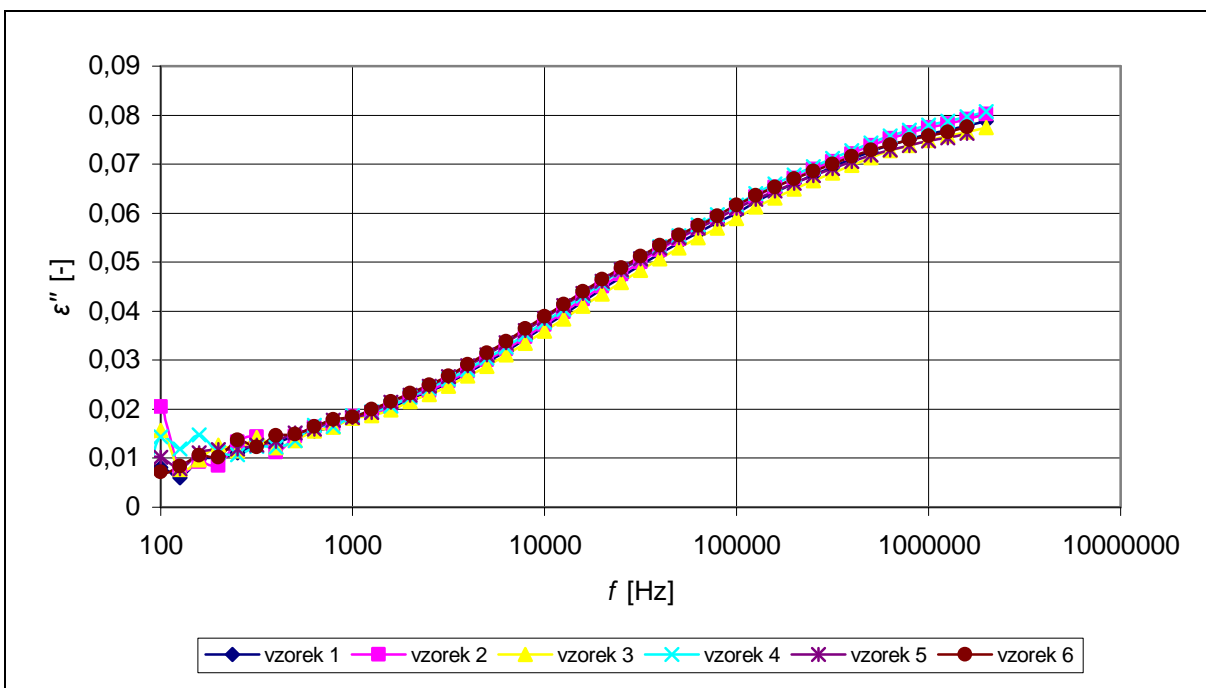
Výsledky měření složek komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu s parametrem relativní vlhkosti (0 %, 33 %, 53 %, 75 %, 93 %) a parametrem plnění (0 %, 4 %, 8 %, 12 %, 16 %) mleté slídy byly pro zkušební lakové vzorky vyjádřeny grafickou formou pomocí závislostí $\epsilon' = F(f)$, $\epsilon'' = F(f)$ a $\epsilon'' = F(\epsilon')$. Pro přehlednější zpracování byly kmitočtové závislosti vynášeny od 100 Hz, protože při nižších kmitočtech byly výsledky měření zatíženy velkou chybou.

Na obr. 3.8 až 3.13 jsou uvedeny kmitočtové závislosti relativní primitivity, ztrátového čísla a Coleho – Coleho diagramy pro sady vzorků bez plnění pro relativní vlhkost 0 a 93 %. Na obr. 3.14 až 3.19 jsou obdobné závislosti pro sady vzorků s plněním 16 % mleté slídy. Na obr. 3.20 až 3.25 jsou znázorněny závislosti vybraných vzorků s různým plněním pro relativní vlhkosti 0 a 93 %. Na obr. 3.26 a 3.27 je srovnání nalhání vybraných vzorků s plněními 0 a 16 % při relativních vlhkostech 0 a 93 %. Na obr. 3.28 až 3.37 jsou zobrazeny závislosti vybraných vzorků s různým plněním, kde byla jako parametr zvolena relativní vlhkost.

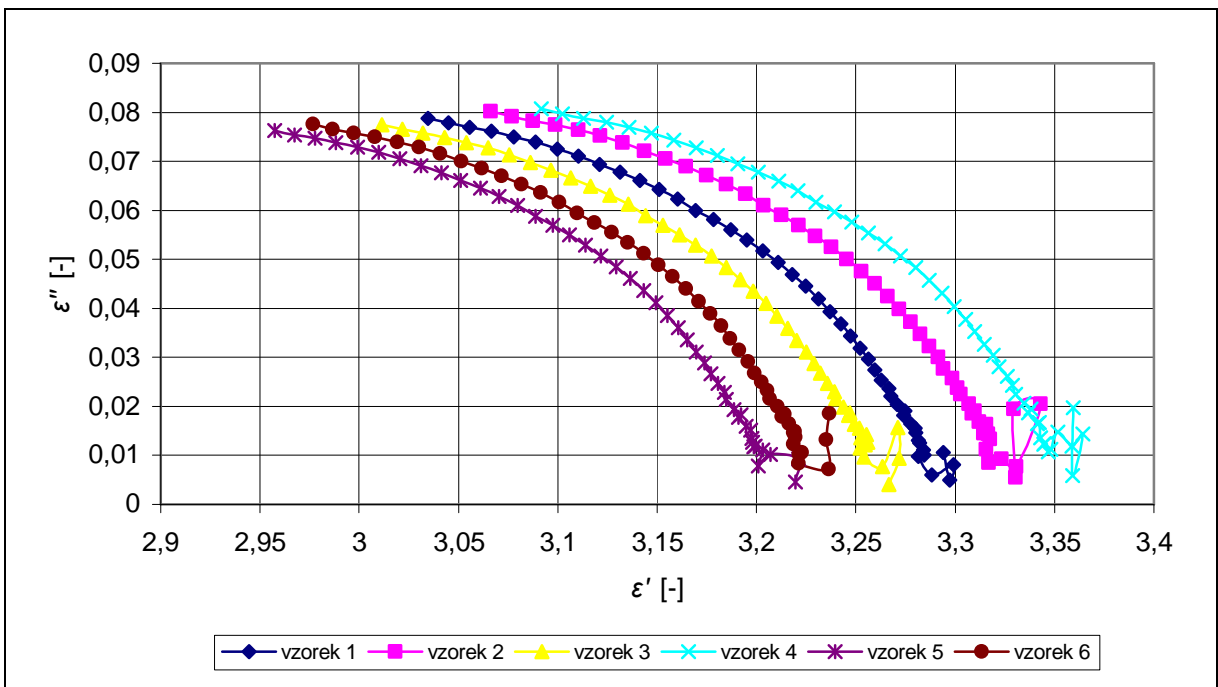
Vzhledem k rozsáhlosti práce byly vybrány pouze výše uvedené grafické závislosti. Zbývající závislosti, včetně zobrazených, jsou uvedeny na přiloženém digitálním médiu.



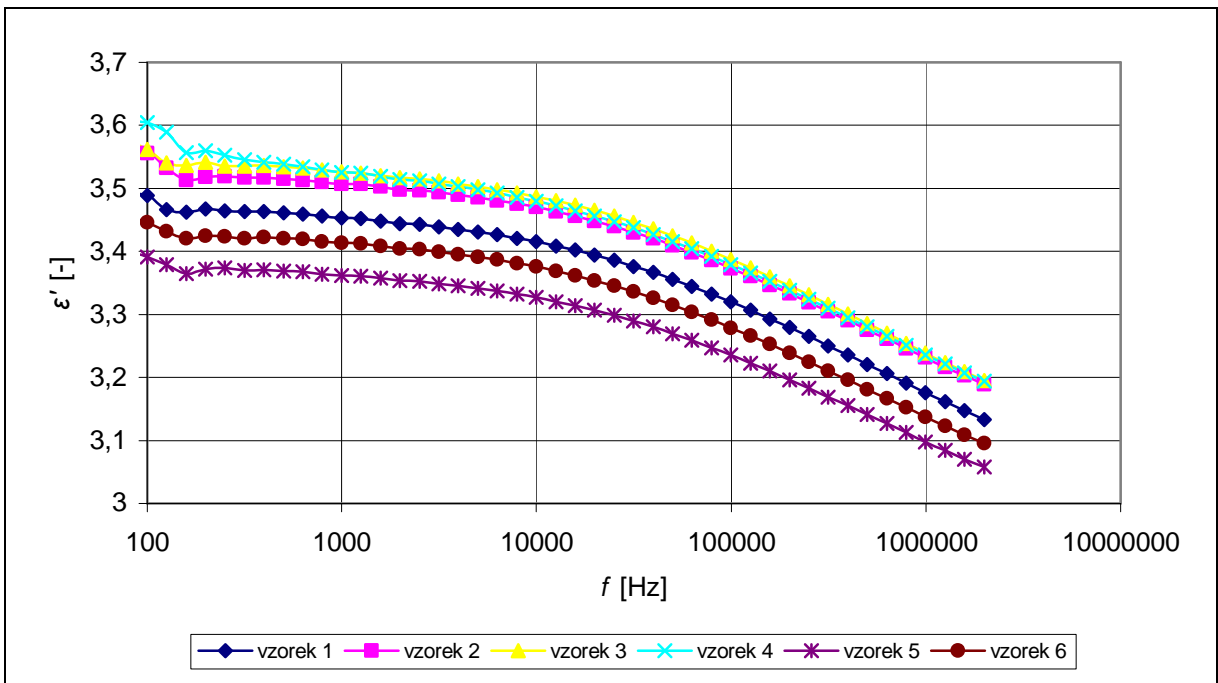
Obr. 3.8: Kmitočtová závislost ϵ' sady vzorků čistého laku pro vlhkost 0 %



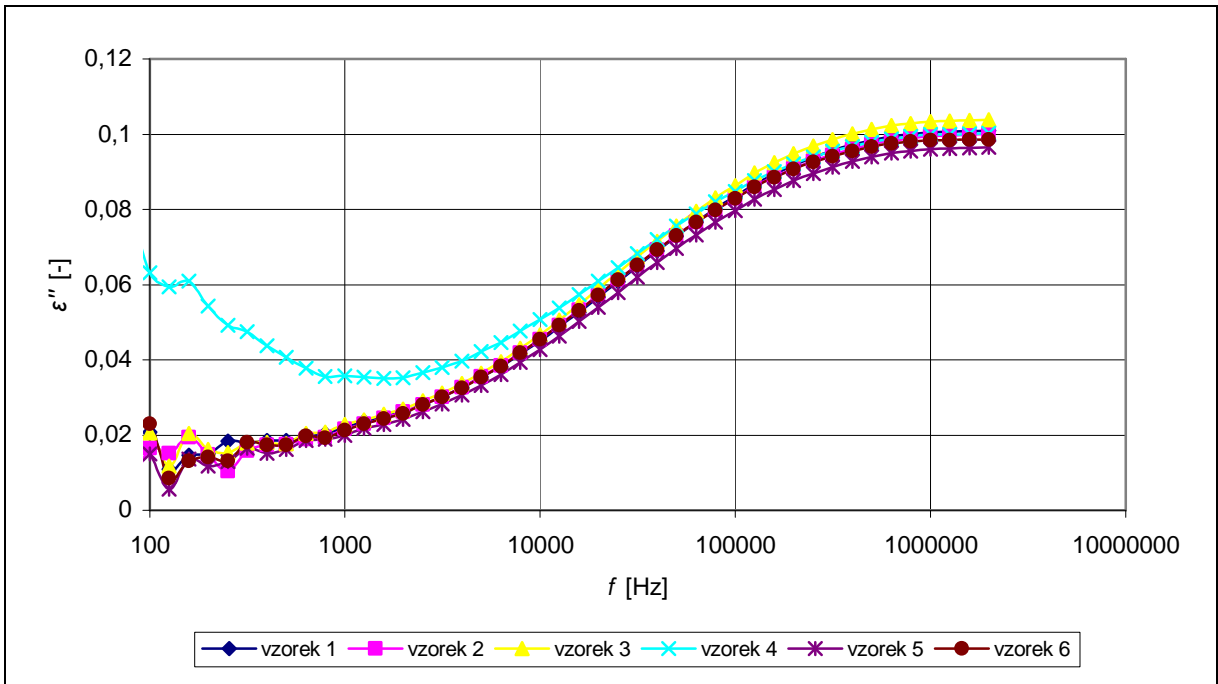
Obr. 3.9: Kmitočtová závislost ϵ'' sady vzorků čistého laku pro vlhkost 0 %



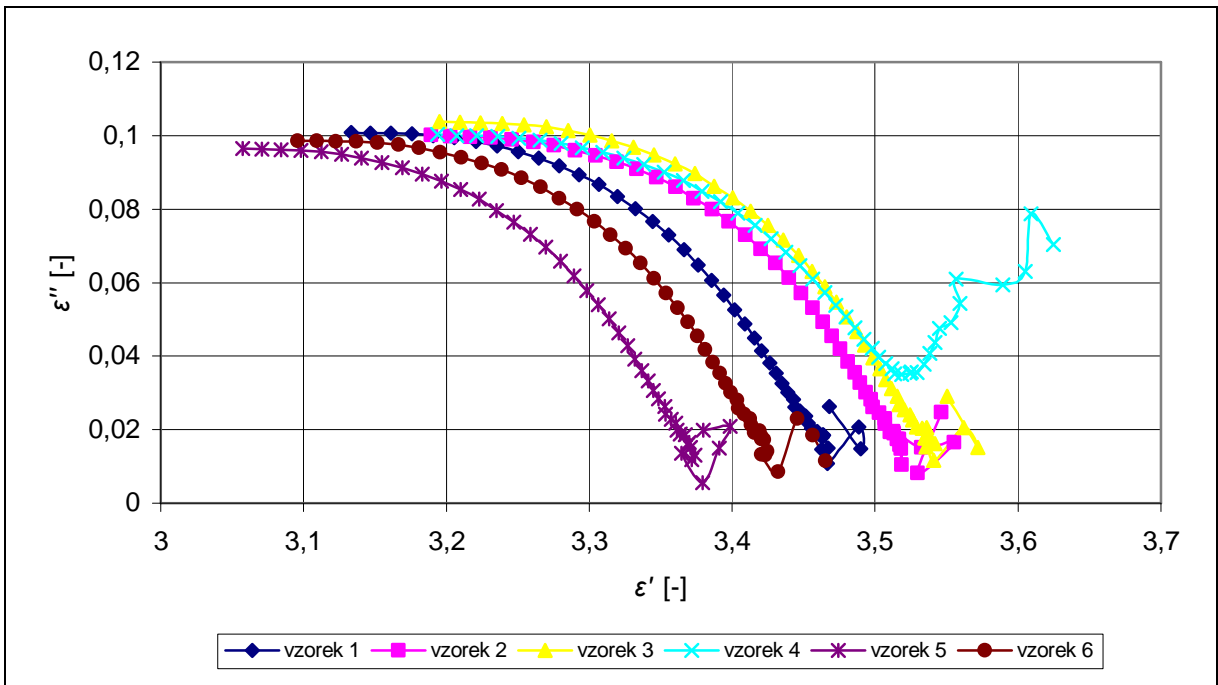
Obr. 3.10: Coleho – Coleho diagram sady vzorků čistého laku pro vlhkost 0 %



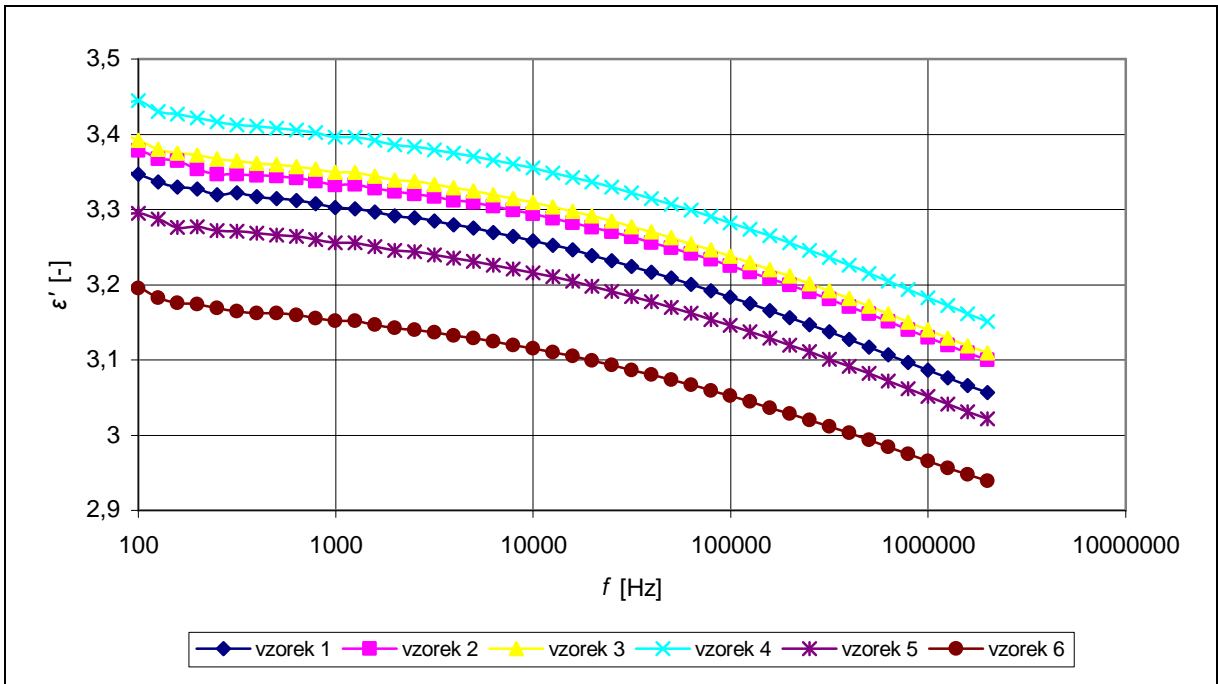
Obr. 3.11: Kmitočtová závislost ε' sady vzorků čistého laku pro vlhkost 93 %



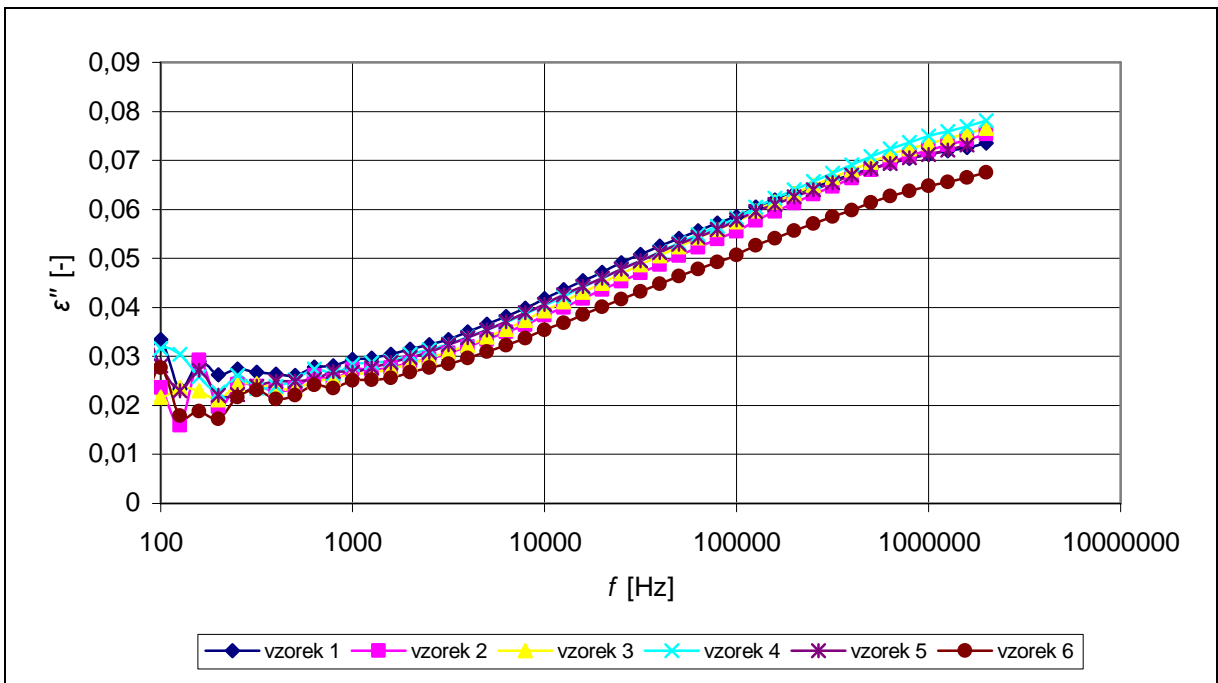
Obr. 3.12: Kmitočtová závislost ε'' sady vzorků čistého laku pro vlhkost 93 %



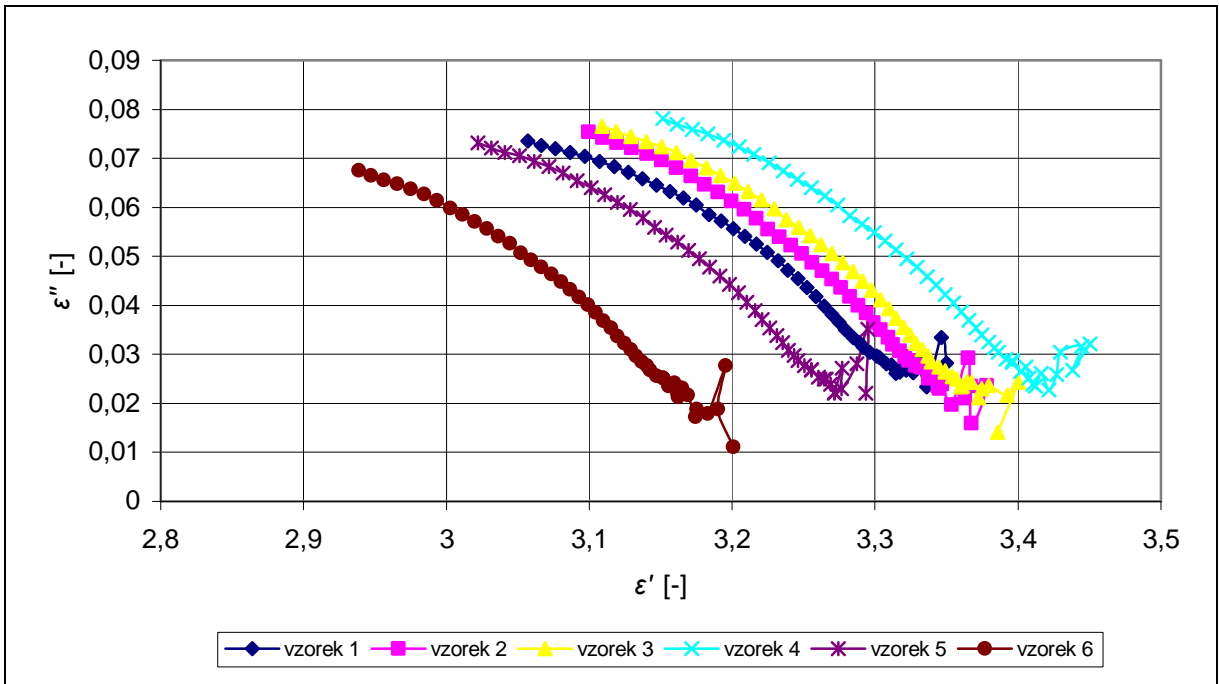
Obr. 3.13: Coleho – Coleho diagram sady vzorků čistého laku pro vlhkost 93 %



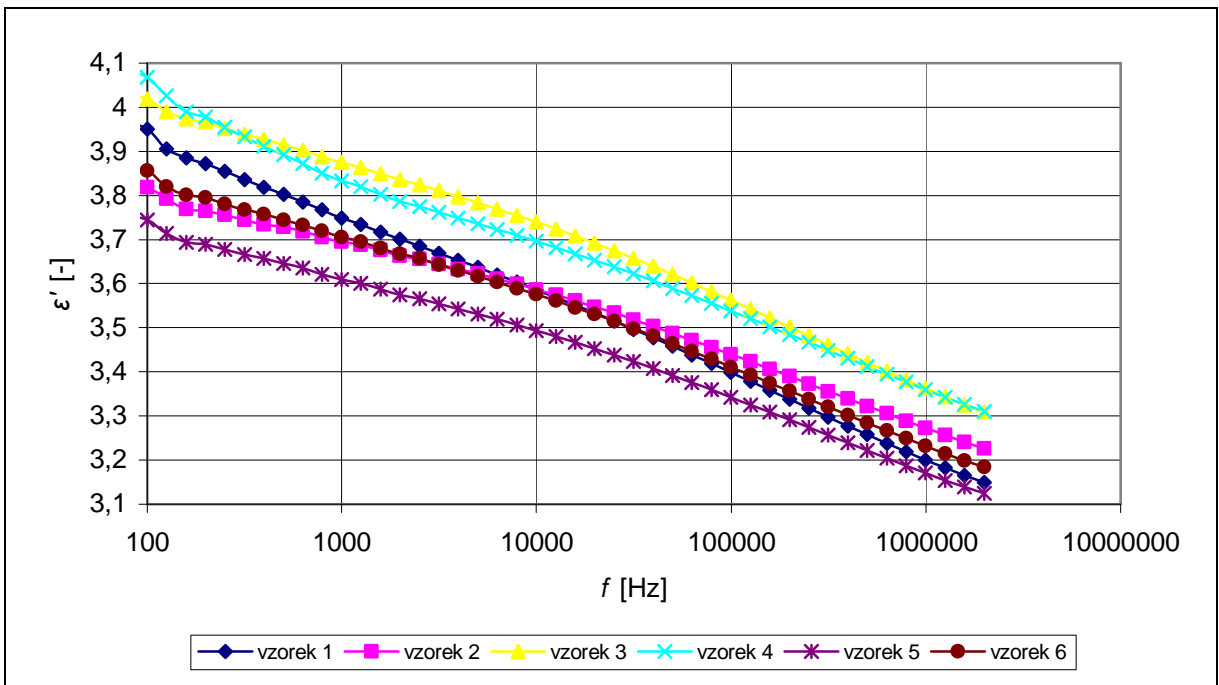
Obr. 3.14: Kmitočtová závislost ϵ' sady vzorků s 84 % laku a 16 % slídy pro vlhkost 0 %



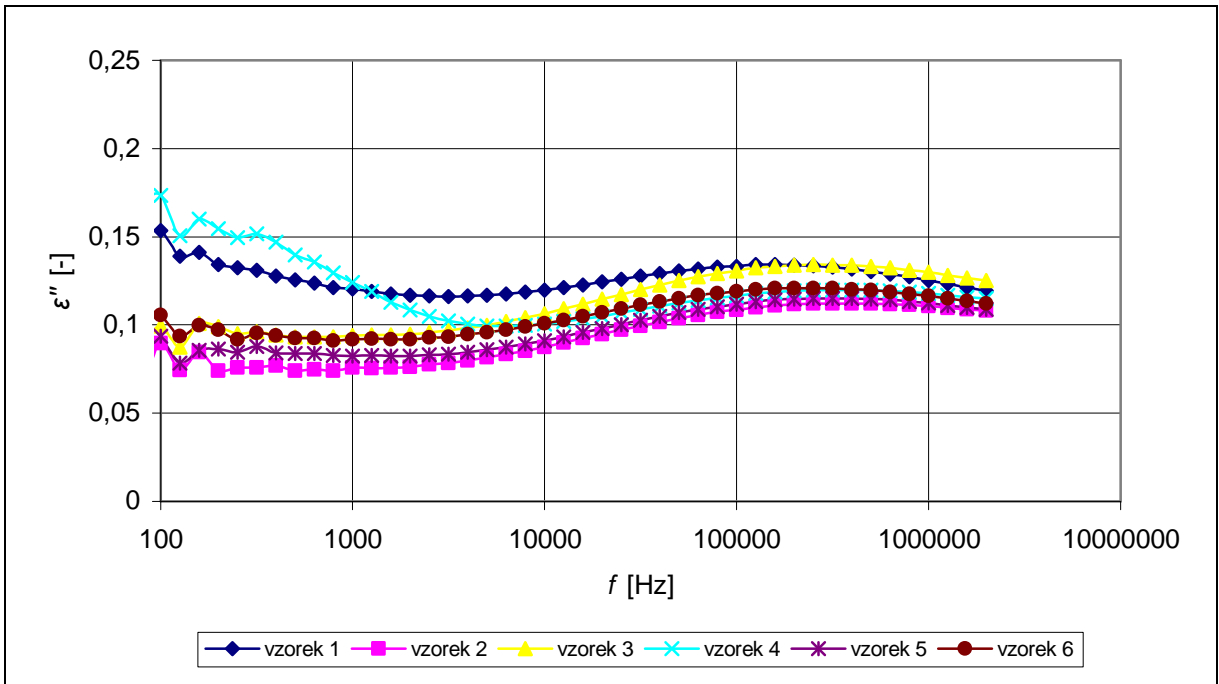
Obr. 3.15: Kmitočtová závislost ϵ'' sady vzorků 84 % laku a 16 % slídy pro vlhkost 0 %



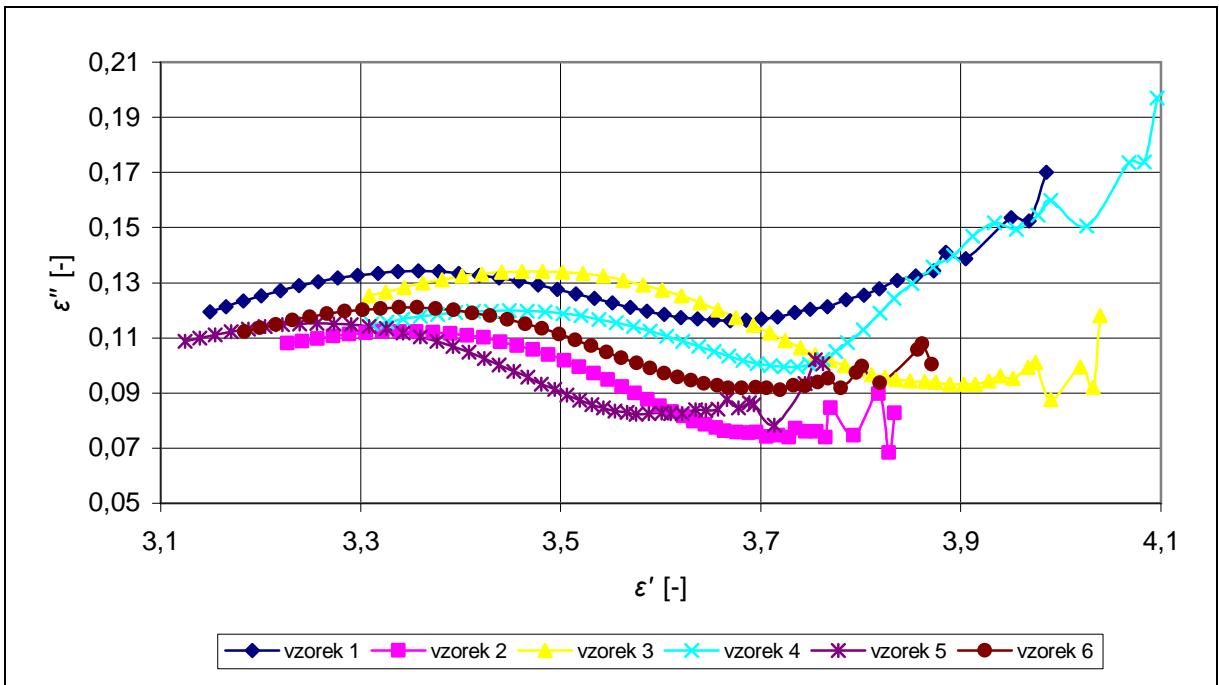
Obr. 3.16: Coleho – Coleho diagram sady vzorků s 84 % laku a 16 % slídy pro vlhkost 0 %



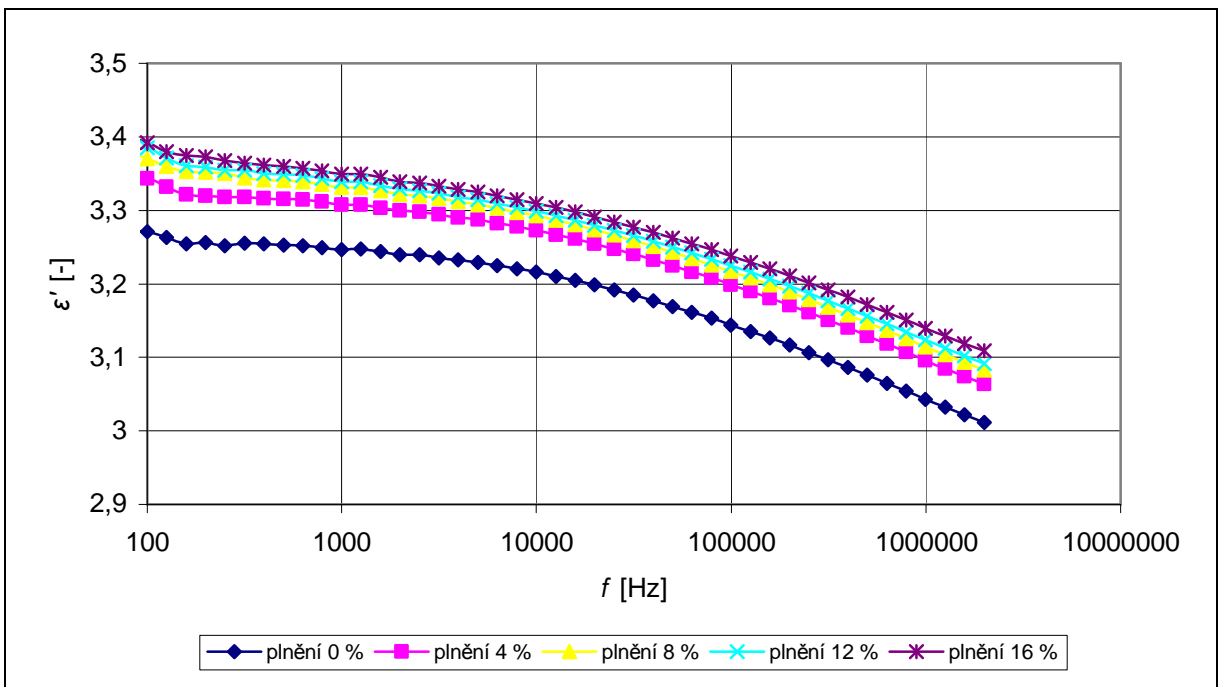
Obr. 3.17: Kmitočtová závislost ϵ' sady vzorků s 84 % laku a 16 % slídy pro vlhkost 93 %



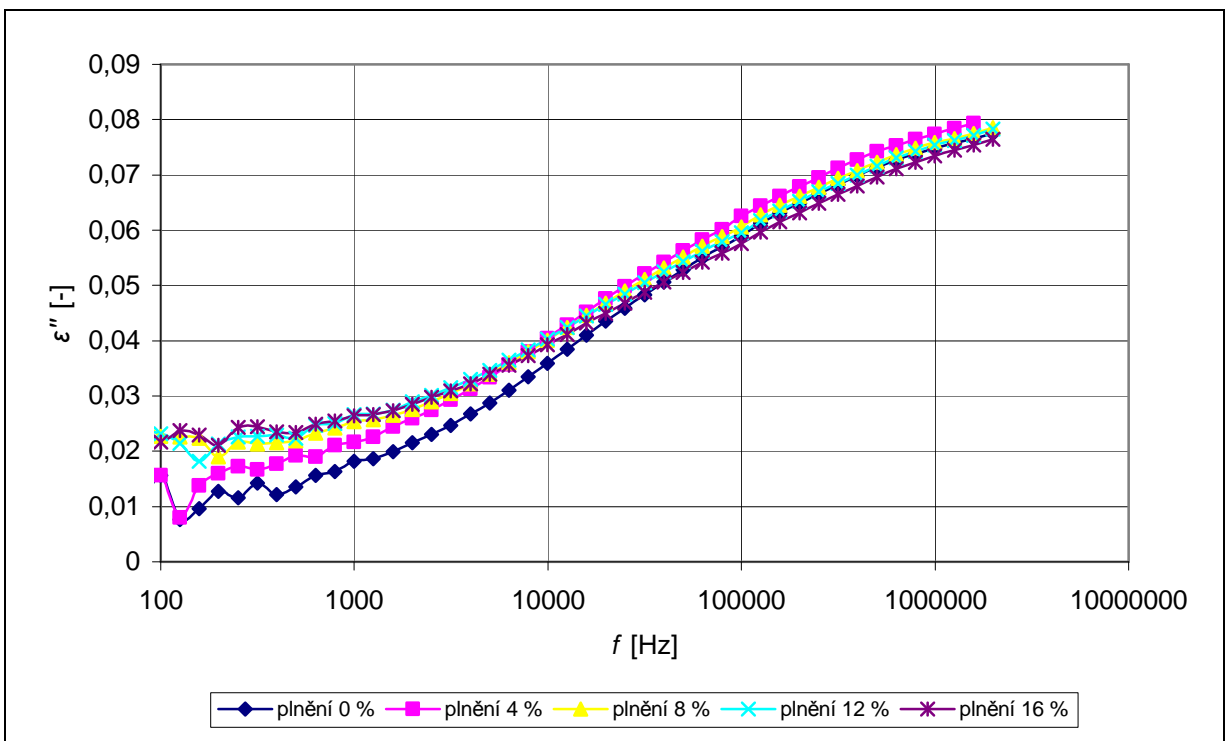
Obr. 3.18: Kmitočtová závislost ε'' sady vzorků s 84 % laku a 16 % slídy pro vlhkost 93 %



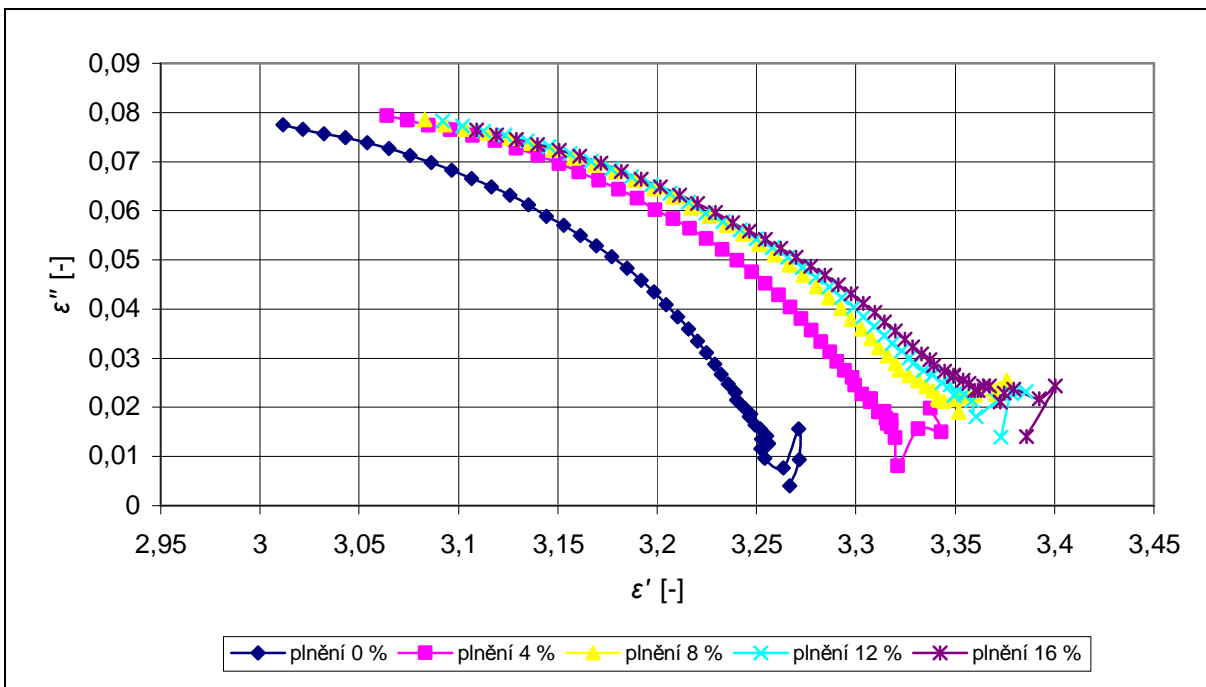
Obr. 3.19: Coleho – Coleho diagram sady vzorků s 84 % laku a 16 % slídy pro vlhkost 93 %



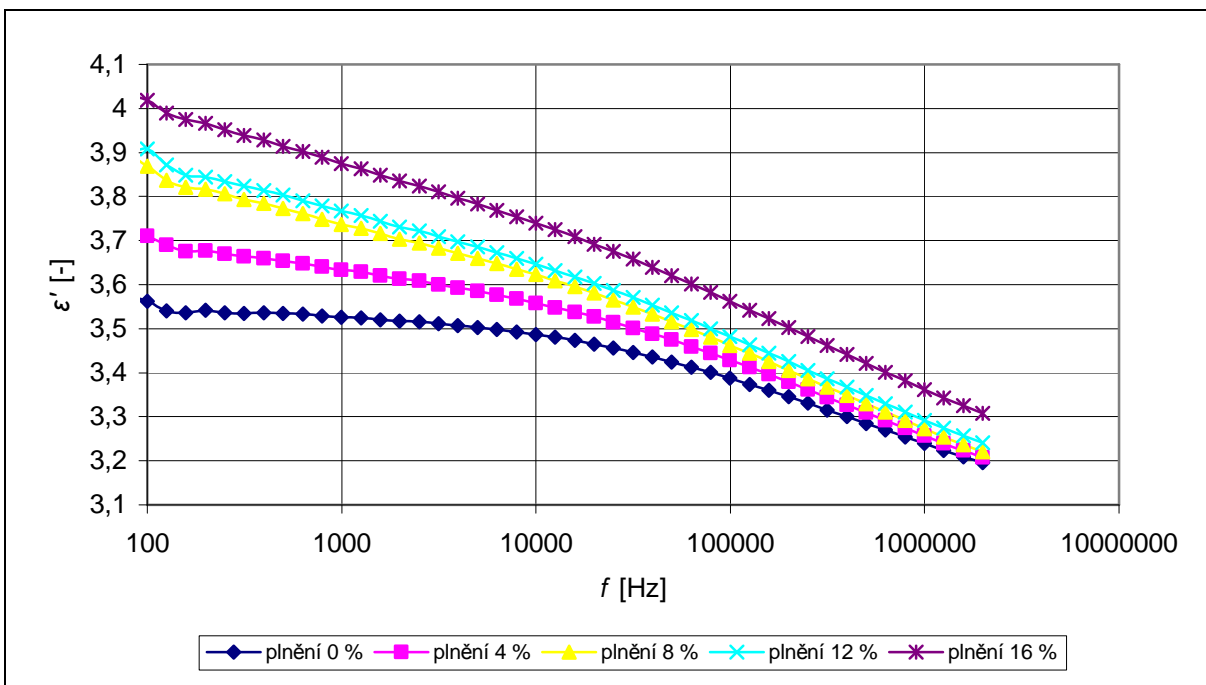
Obr. 3.20: Kmitočtová závislost ϵ' lakových vzorků s různým plněním slídy pro vlhkost 0 %



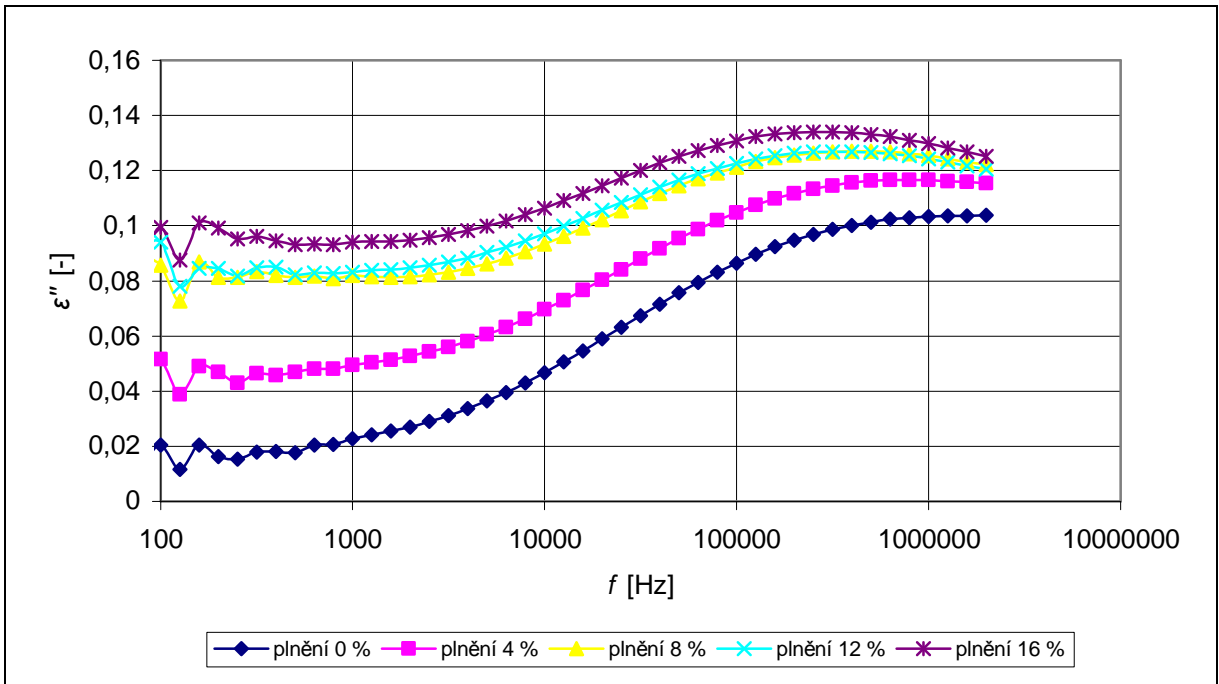
Obr. 3.21: Kmitočtová závislost ϵ'' lakových vzorků s různým plněním slídy pro vlhkost 0 %



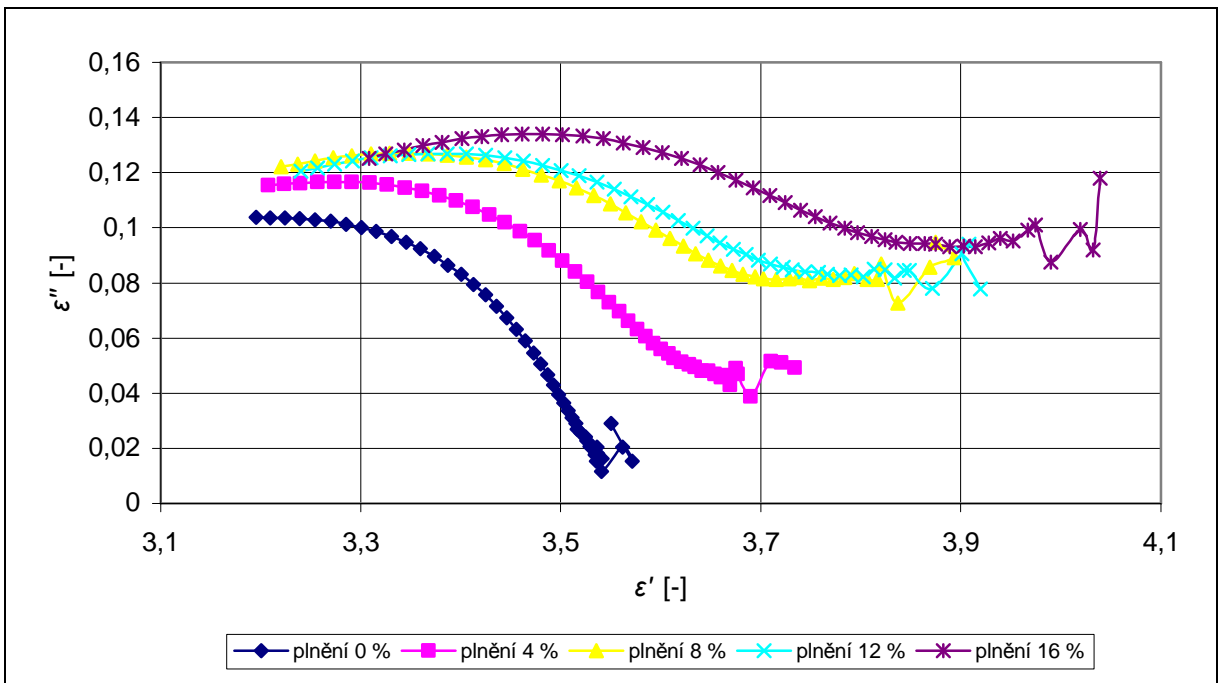
Obr. 3.22: Coleho – Coleho diagram lakových vzorků s různým plněním slídy pro vlhkost 0 %



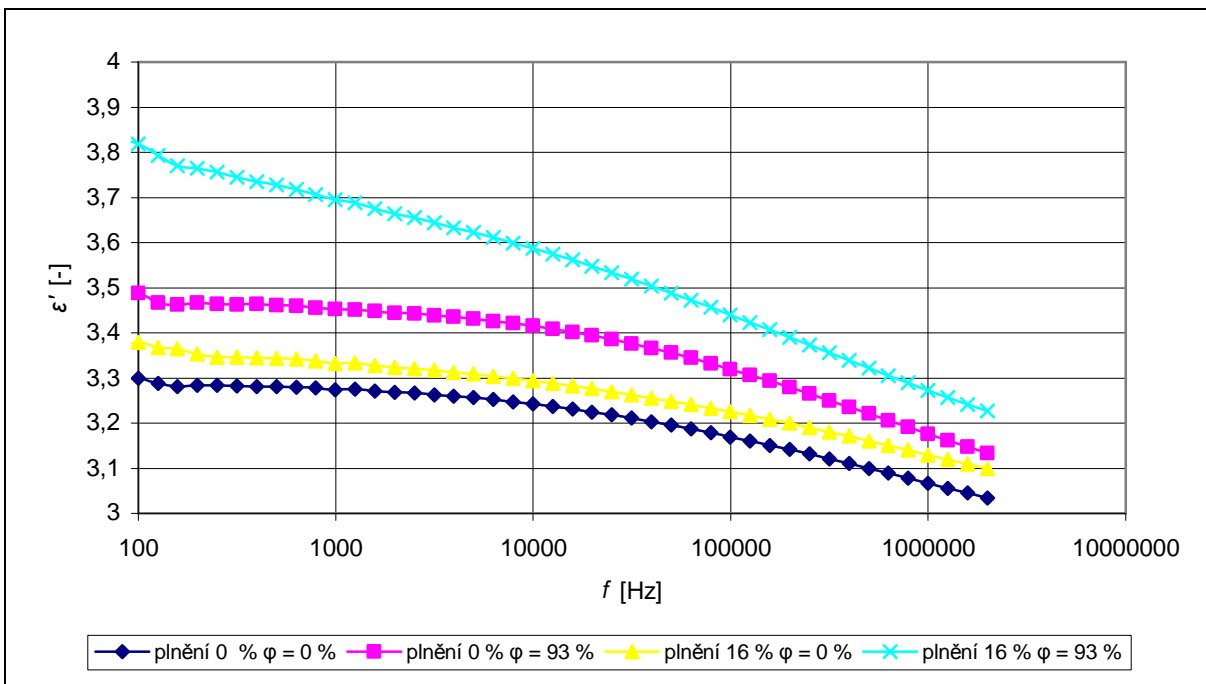
Obr. 3.23: Kmitočtová závislost ϵ' lakových vzorků s různým plněním slídy pro vlhkost 93 %



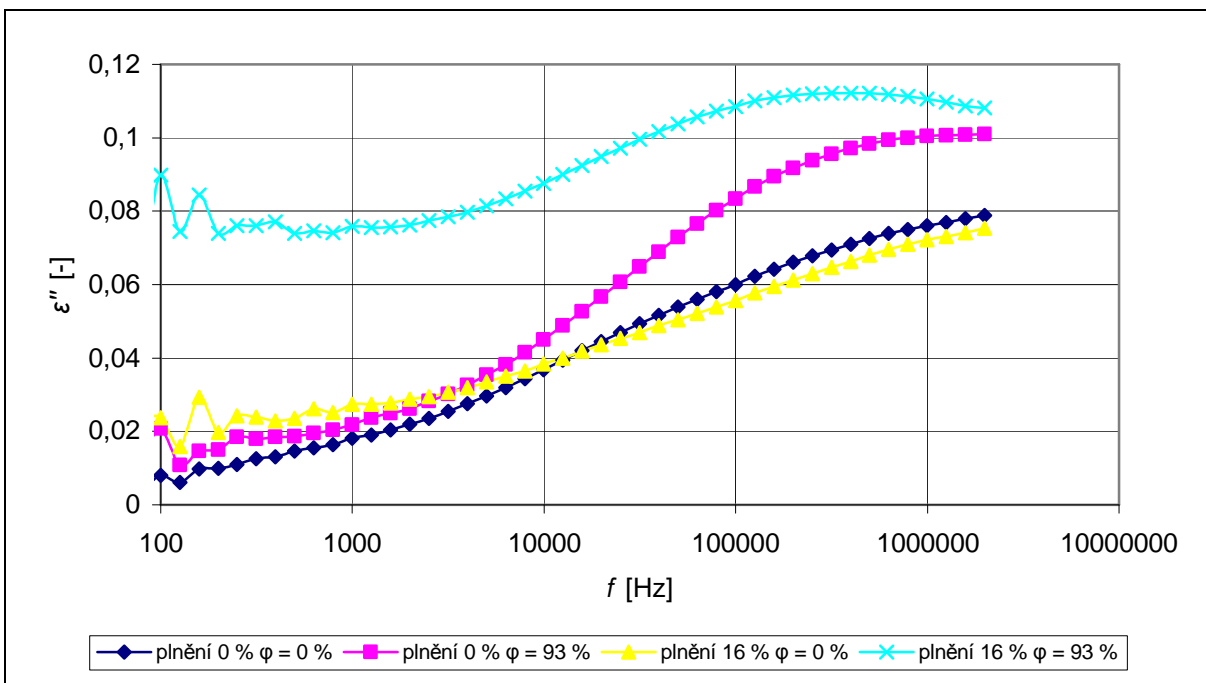
Obr. 3.24: Kmitočtová závislost ε'' lakových vzorků s různým plněním slídy pro vlhkost 93 %



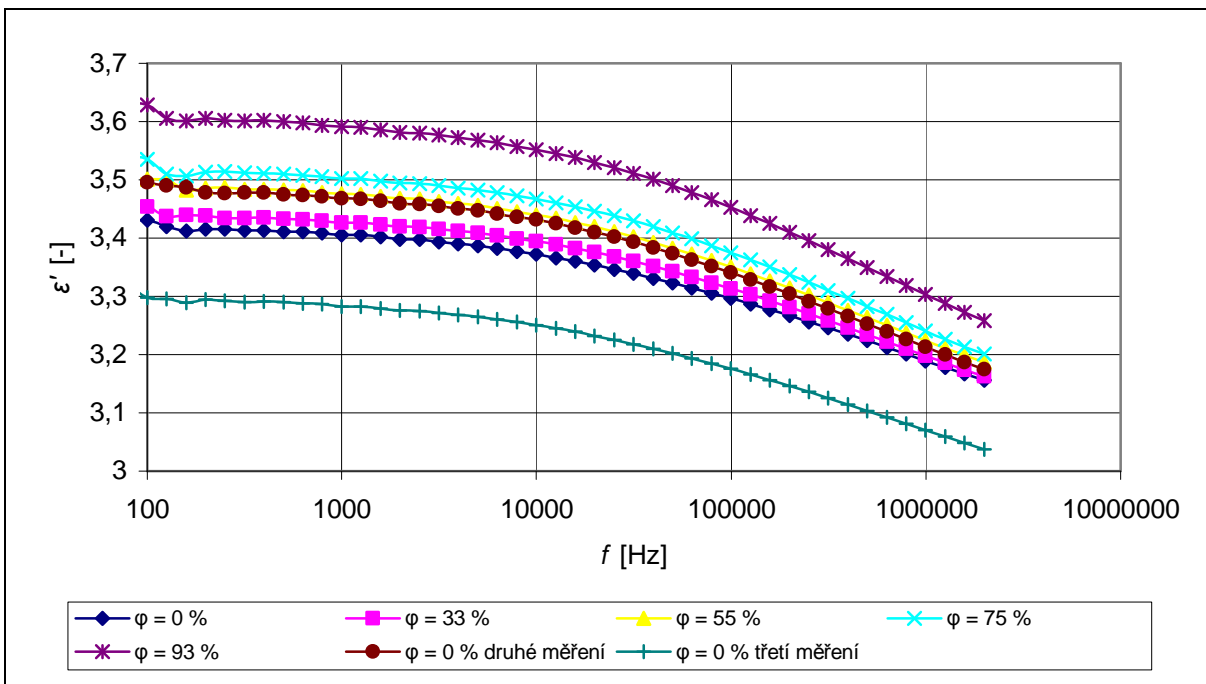
Obr. 3.25: Coleho – Coleho diagram lakových vzorků s různým plněním slídy pro vlhkost 93 %



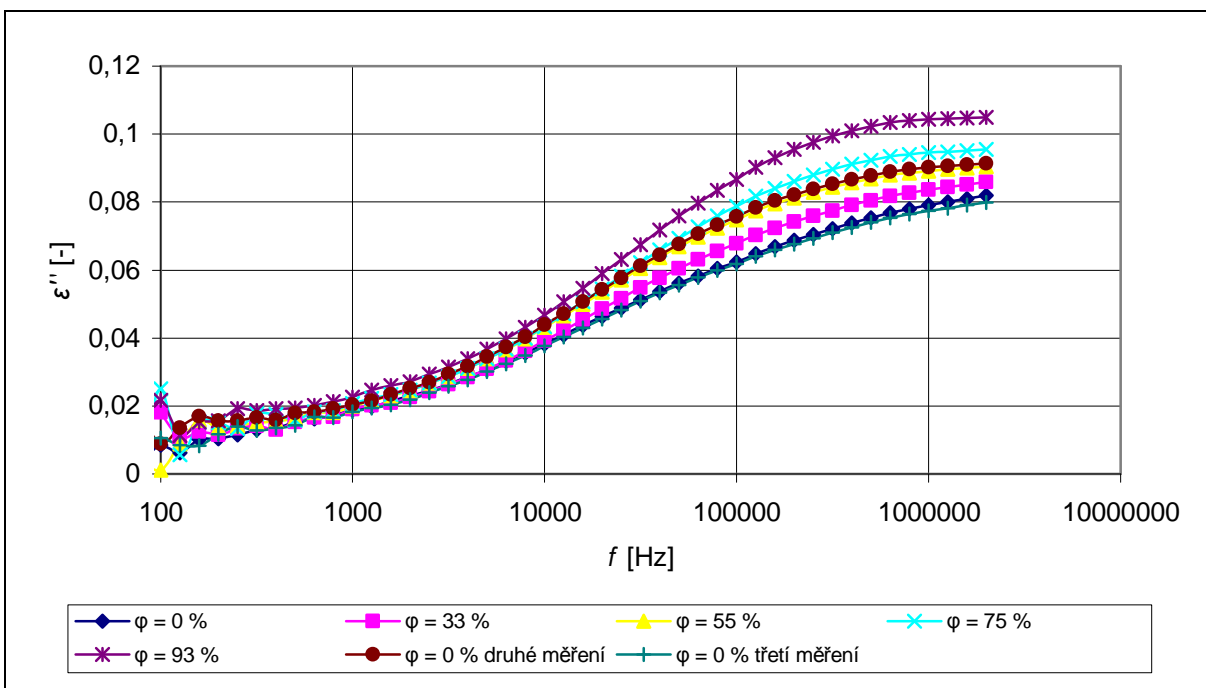
Obr. 3.26: Kmitočtová závislost ε' lakových vzorků s různým plněním při různých vlhkostech



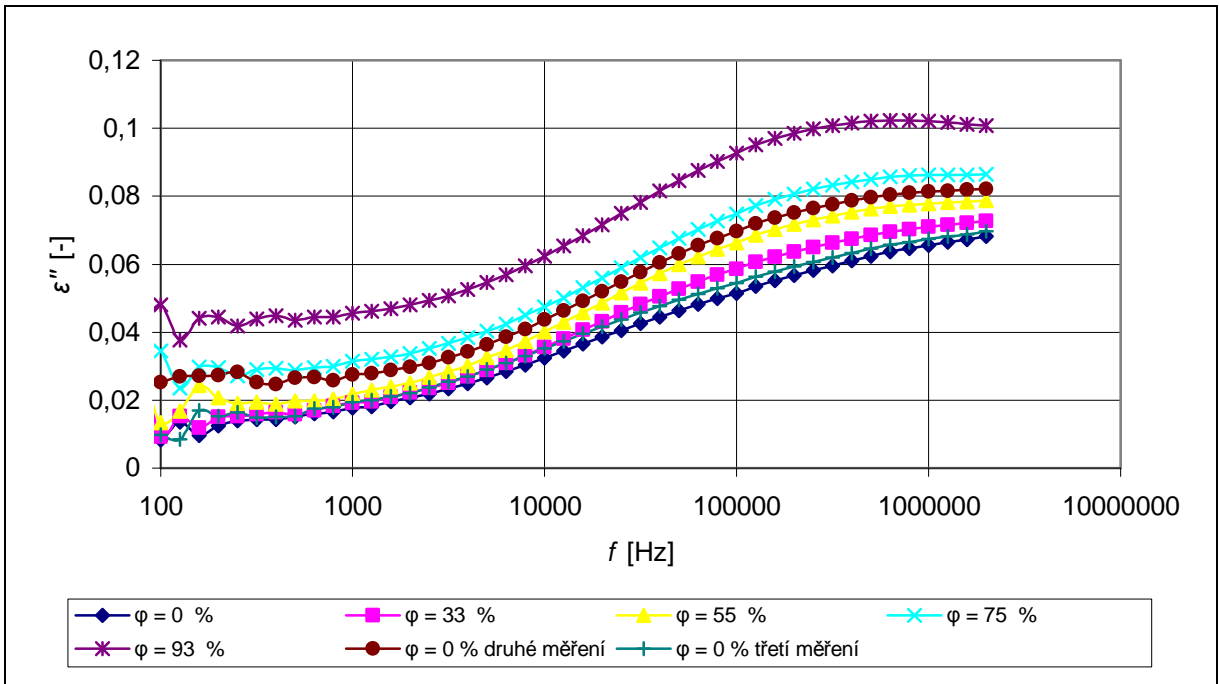
Obr. 3.27: Kmitočtová závislost ε'' lakových vzorků s různým plněním při různých vlhkostech



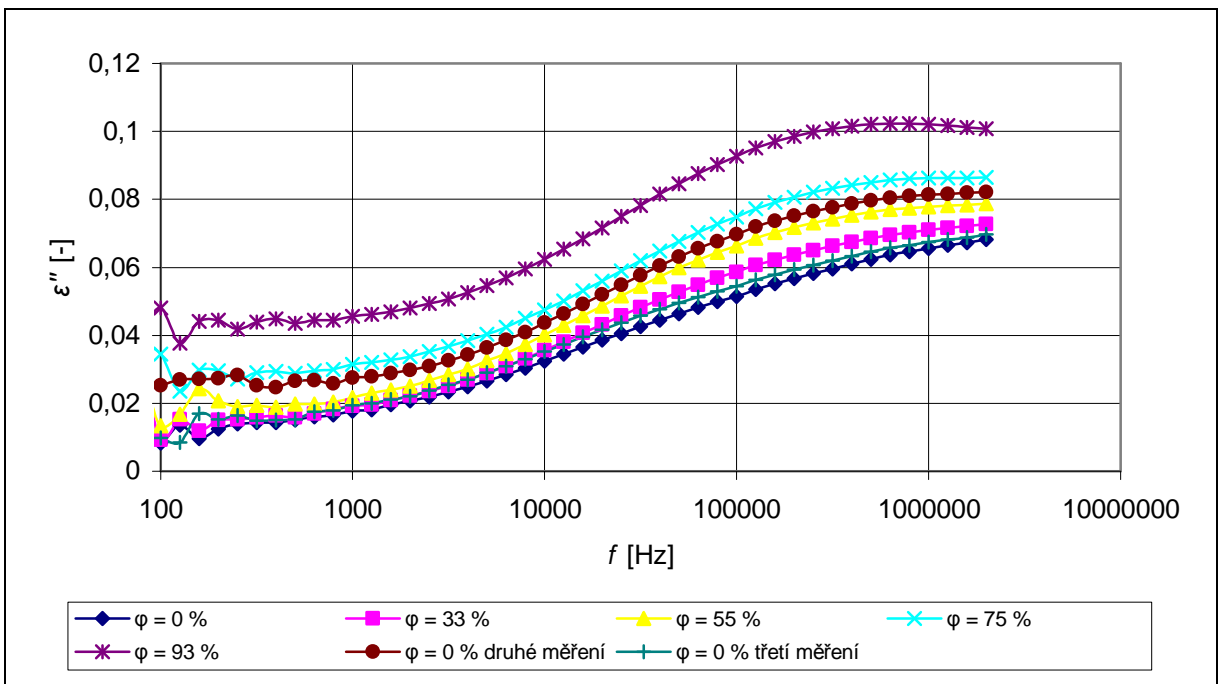
Obr. 3.28: Kmitočtová závislost ϵ' vzorku č.1 čistého laku při různých vlhkostech



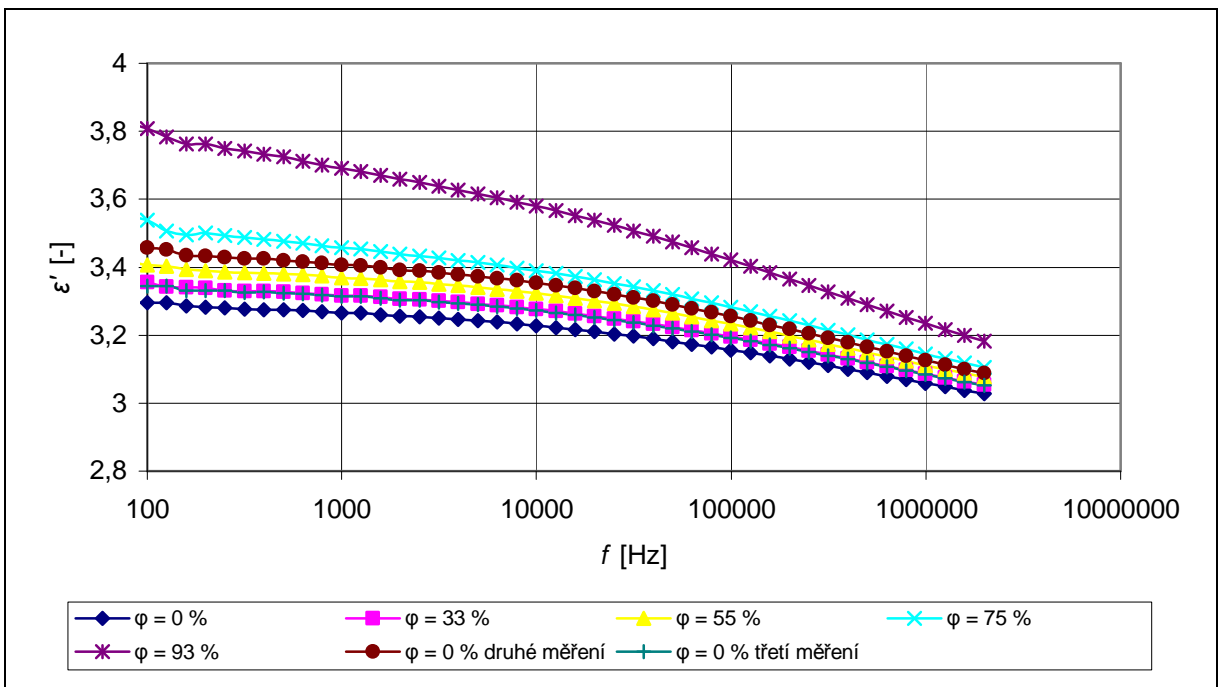
Obr. 3.29: Kmitočtová závislost ϵ'' vzorku č.1 čistého laku při různých vlhkostech



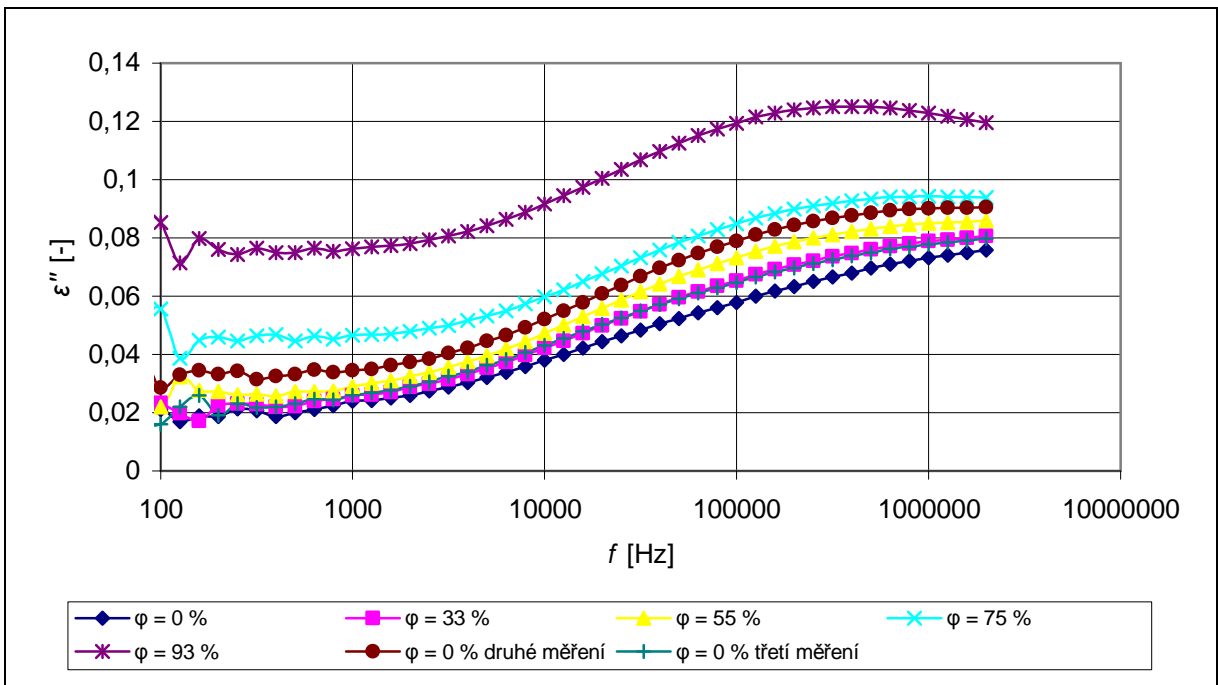
Obr. 3.30: Kmitočtová závislost ε'' vzorku č.4 s 96 % laku a 4 % slídy při různých vlhkostech



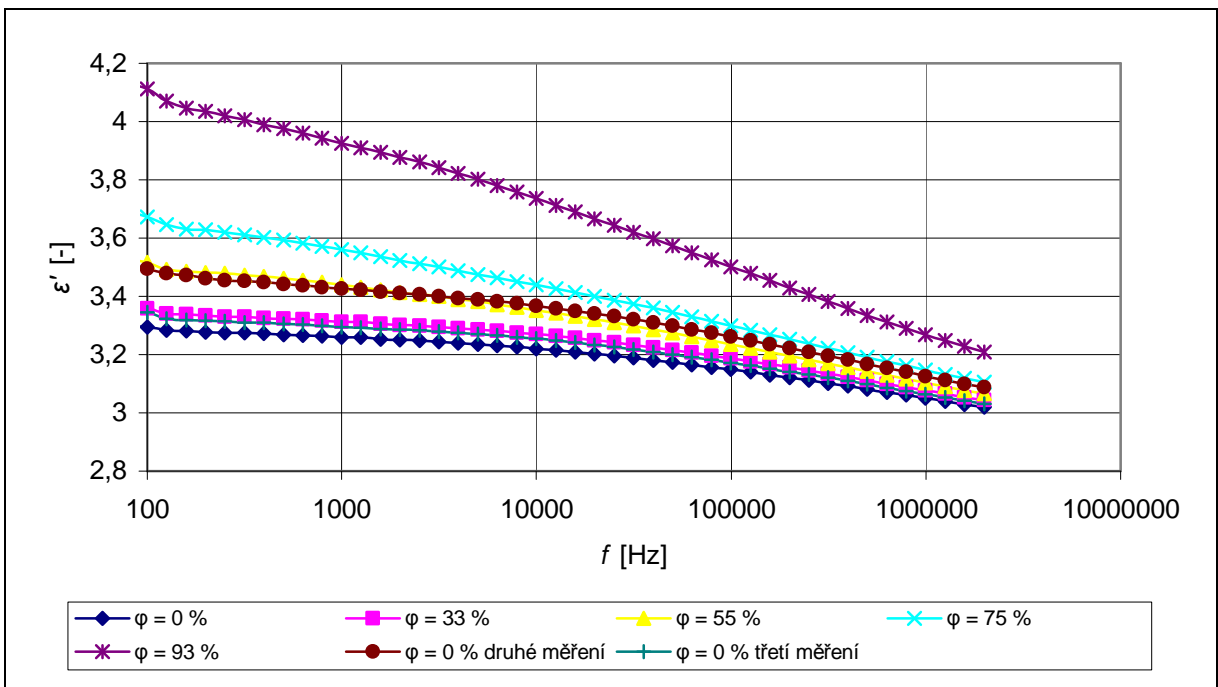
Obr. 3.31: Kmitočtová závislost ε'' vzorku č.4 s 96 % laku a 4 % slídy při různých vlhkostech



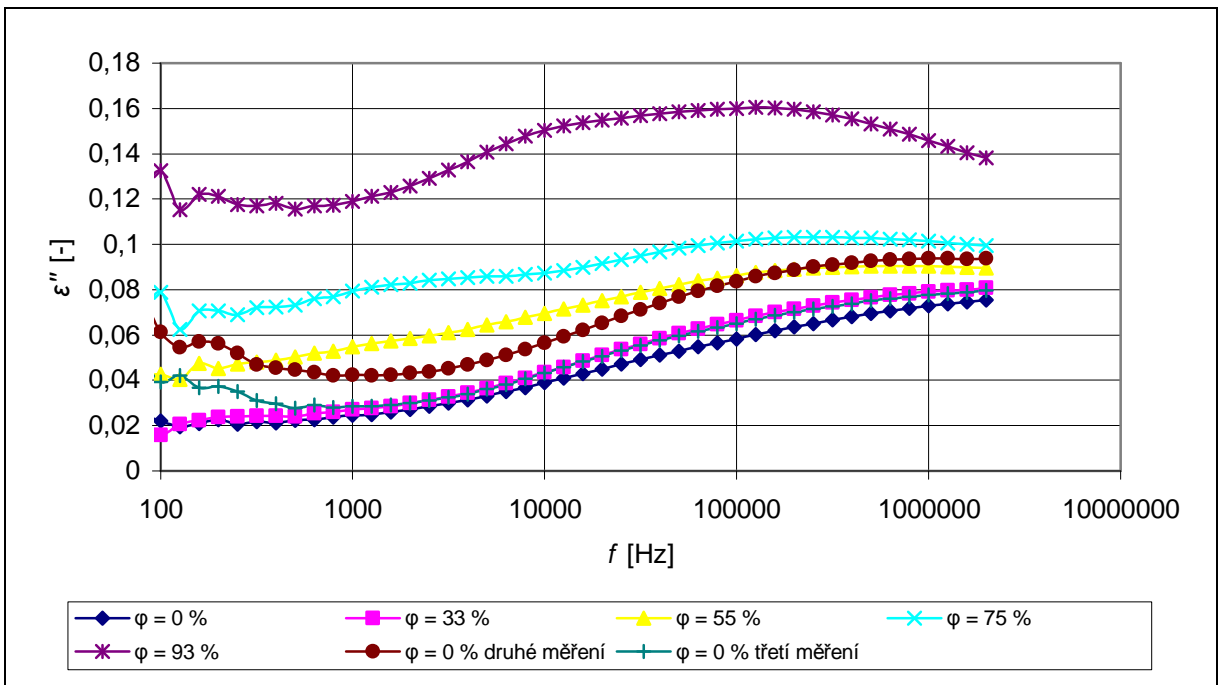
Obr. 3.32: Kmitočtová závislost ϵ' vzorku č.3 s 92 % laku a 8 % slídy při různých vlhkostech



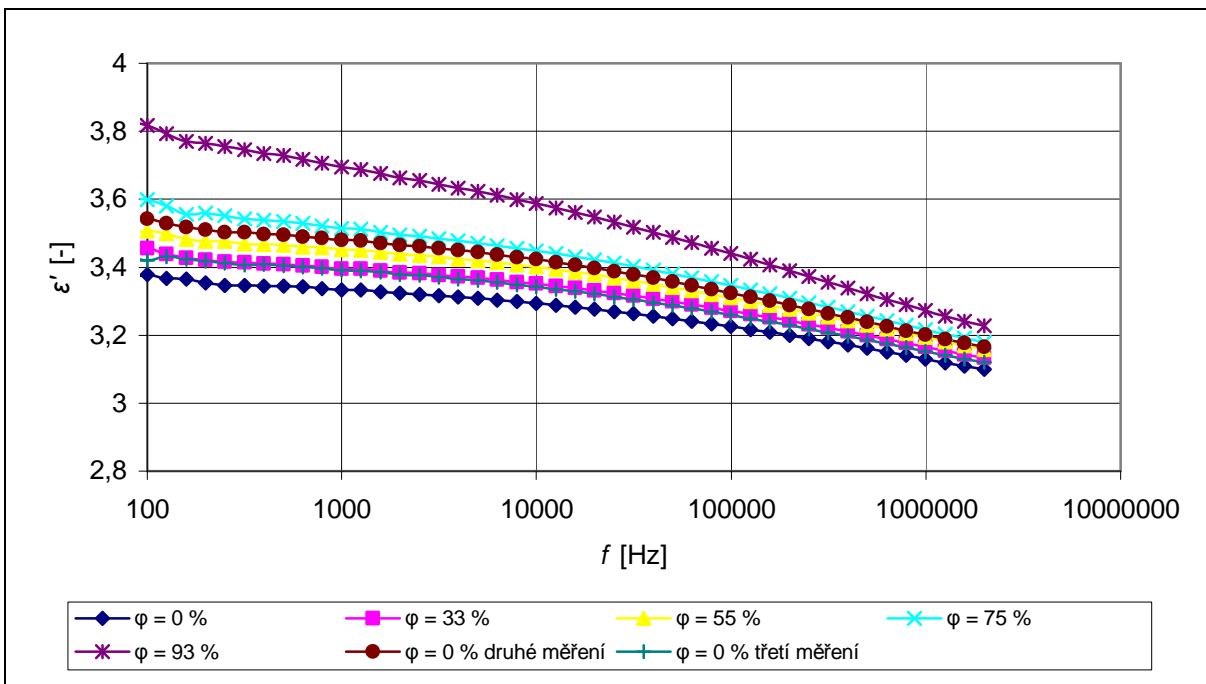
Obr. 3.33: Kmitočtová závislost ϵ'' vzorku č.3 s 92 % laku a 8 % slídy při různých vlhkostech



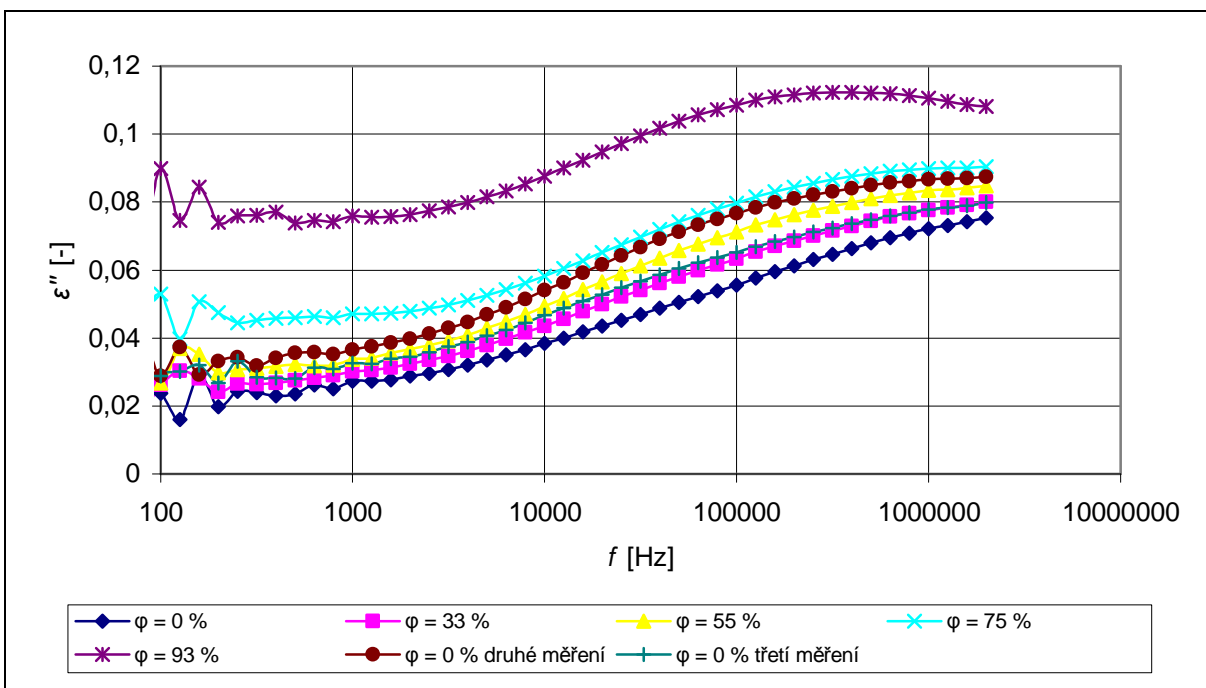
Obr. 3.34: Kmitočtová závislost ϵ' vzorku č.1 s 88 % luku a 12 % slídy při různých vlhkostech



Obr. 3.35: Kmitočtová závislost ϵ'' vzorku č.1 s 88 % luku a 12 % slídy při různých vlhkostech



Obr. 3.36: Kmitočtová závislost ε' vzorku č.2 s 84 % laku a 16 % slídy při různých vlhkostech



Obr. 3.37: Kmitočtová závislost ε'' vzorku č.2 s 84 % laku a 16 % slídy při různých vlhkostech

3.5 Vyhodnocení experimentu

Ze získaných výsledků je zjevné, že průběhy kmitočtových závislostí složek komplexní permitivity laku TSA 220S odpovídají teoretickým předpokladům. Hodnota relativní permitivity ϵ' klesá s rostoucím kmitočtem, hodnota ztrátového čísla ϵ'' roste až do relaxačního maxima a poté klesá. Z kmitočtových závislostí ϵ'' lze usoudit, že se vyskytují dvě relaxační maxima, při vysokých kmitočtech ($10^5 - 10^6$ Hz) a v oblasti nízkých kmitočtů (pod 200 Hz). Relaxační charakter je patrný i z průběhu závislostí $\epsilon'' = F(\epsilon')$.

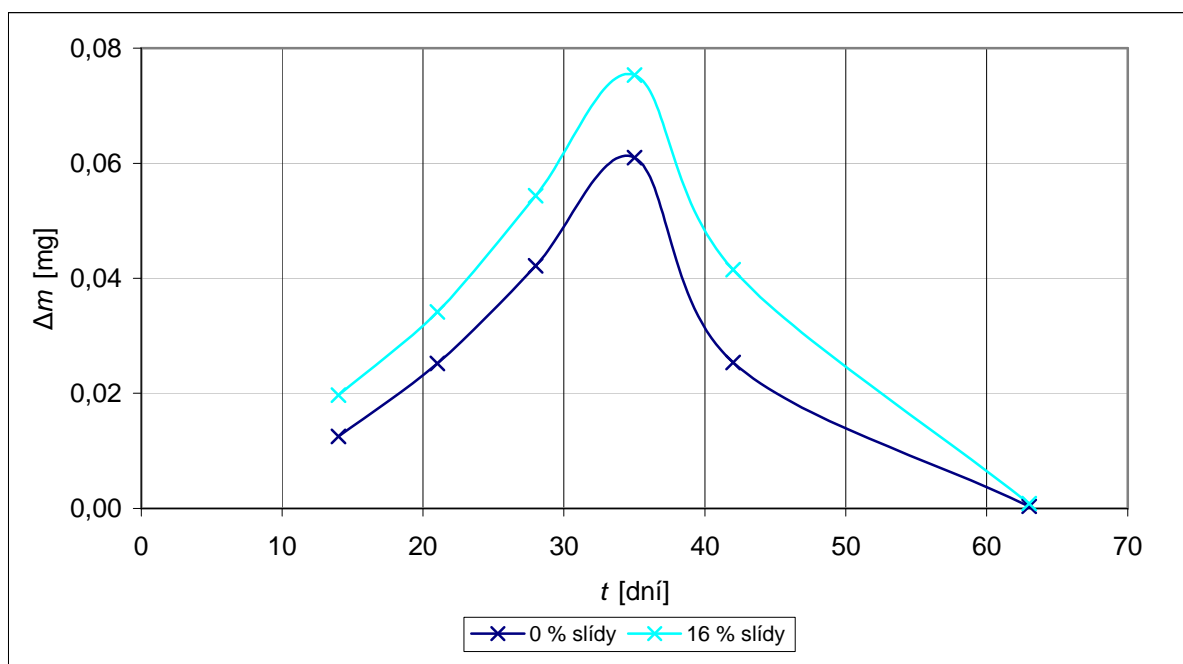
Vliv technologie přípravy zkušebních vzorků neukázal výrazný vliv na dielektrické vlastnosti laku, ale měl významný vliv na geometrické tvary vzorků. Ovlivňuje nerovnost povrchu, deformaci vzorku při vytvrzování nebo tvorbu vzduchových bublin. Ze zkoumaných technologií přípravy vzorků se nejvíce osvědčily jednoduché teflonové formy. Vzhledem k tomu, že byly použity formy různé hloubky, měly vytvrzené vzorky různou hmotnost a tloušťku. Z toho důvodu je možné, že se v některých vzorcích vytvořilo více vzduchových bublin, proto nejsou naměřené hodnoty ϵ' a ϵ'' totožné při stejném plnění slídou. Viz. obr. 3.8 až obr. 3.19.

Vzhledem k makroskopické nehomogenitě vzorků je nutné dodržovat neměnnou polohu vzorků v elektrodovém systému během experimentu. Každá změna polohy může znamenat zatížení experimentu jinou chybou.

Dlouhodobé navlhávání ovlivňuje sledované dielektrické vlastnosti. S rostoucí vlhkostí si kmitočtové průběhy zachovávají přibližně stejný tvar, ale dochází ke změně hodnot sledovaných veličin. Permitivita v souladu s teoretickými předpoklady s rostoucí vlhkostí stoupá, ztrátové číslo se zvětšuje a současně se posouvá poloha relaxačního maxima. Nejvýraznější vliv vlhkosti vzhledem k plnění se projevuje při relativní vlhkosti 93 %, což je patrné z velkého růstu ϵ' a ϵ'' zejména při nízkých kmitočtech. Tato závislost je zobrazena na obr. 3.26 a 3.27. Je zřejmé, že vlhkost ovlivnila mnohem víc vzorky s 16% hmotnostním plněním než čistý lak. Například při 100 Hz se ϵ' u čistého laku zvětšilo o 0,189 a u plněného vzorku o 0,44. Vliv plnění na ϵ' a ϵ'' je znázorněn na obr. 3.20 až obr. 3.25. Z těchto závislostí je vidět, že čím více slídy je obsaženo v laku, tím větší jsou ϵ' a ϵ'' . Také je vidět zřetelný vliv slídy na hodnoty ϵ' a ϵ'' , kdy se zvyšující se vlhkosti rostou hodnoty složek ϵ^* a to hlavně při nízkých kmitočtech. Na obr. 3.28 až obr. 3.37 jsou znázorněny průběhy ϵ' a ϵ'' vybraných vzorků z každé sady při různých vlhkostech.

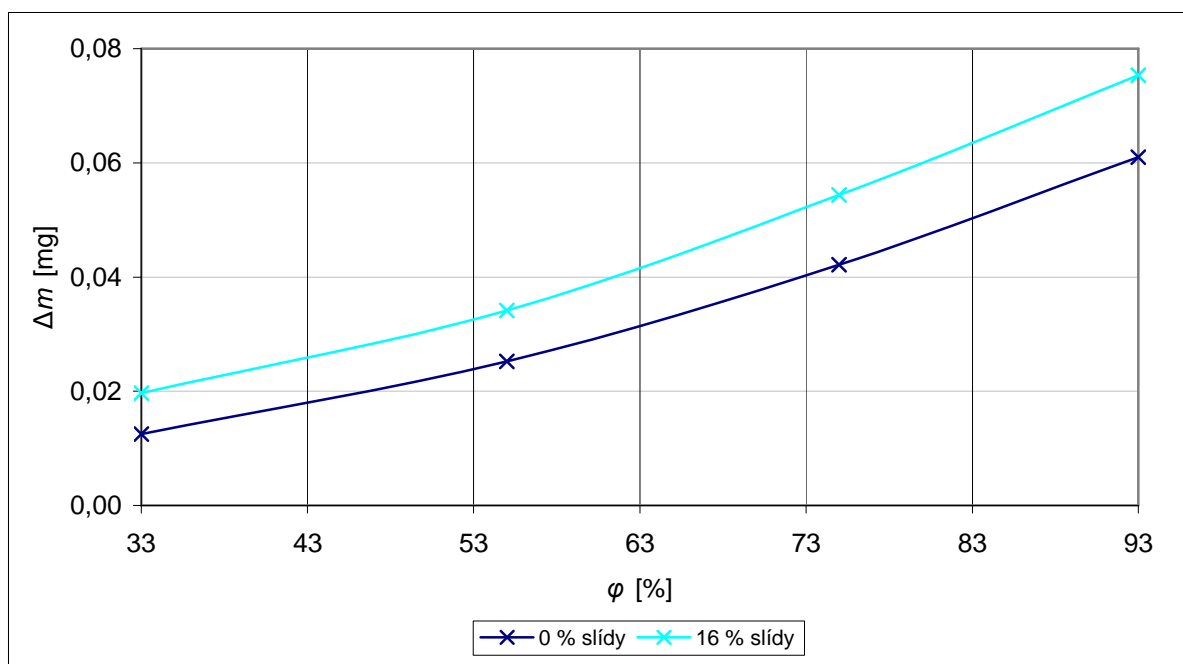
Hmotnost vzorků se s relativní vlhkostí mění. Vzorky čistého laku po expozici v prostředí s relativní vlhkosti 33 % zvětšily svou hmotnost v průměru o 13 mg, zatímco vzorky s 16%

hmotnostním plněním zvětšily hmotnost o 20 mg. Při relativní vlhkosti 93 % to bylo o 61 mg pro čistý lak a o 75 mg pro výše zmíněný kompozit. Změny hmotností jsou způsobeny sorpcí vody z prostředí, kterému byly vzorky vystaveny. S rostoucí relativní vlhkostí prostředí hmotnost všech vzorků roste, což odpovídá teoretickým předpokladům. Tato skutečnost je zobrazena na obr 3.38.



Obr. 3.38: Změna hmotnosti v závislosti na době expozice v různých relativních vlhkostech

Jednotlivým časovým úsekům odpovídá vlhkost prostředí, kterému byly vzorky vystaveny. Době 14 dní odpovídá průměrná změna hmotnosti vzorků po týdenní expozici v prostředí o relativní vlhkosti 33 %. Postupně po týdenních expozicích odpovídají časové úseky vlhkostem 55, 75 a 93 %. Je vidět, že hmotnost vzorků, podle předpokladů, se zvyšující se relativní vlhkostí prostředí narůstá viz. obr. 3.39. Další dva body každé křivky odpovídají týdenní a následně třítýdenní expozici v prostředí s nulovou relativní vlhkostí.



Obr. 3.39: Průměrný hmotnostní přírůstek vzorků během navlhání

Pro kontrolu byly na výsledky měření aplikovány fyzikální vztahy pro řešení složených materiálových soustav. Pro výpočet nebyla použita hodnota relativní permitivity výrobce ($\epsilon' = 3,6$), ale byla použita průměrná hodnota $\epsilon' = 3,289$ při 100 Hz sady vzorků čistého laku. Hodnota relativní permitivity slídy $\epsilon' = 5,3$ byla experimentálně zjištěna měřením kolegy Petra Mohyly, který se zabývá obdobným experimentem. V následující tabulce jsou vypočtené výsledky a jsou porovnány s naměřenými hodnotami vzorků s 88 % laku a 12 % slídy.

Tab. 3.6: Porovnání naměřené a vypočtené hodnoty ε' složené soustavy s 88% laku a 12% slídy

Metoda výpočtu [-]	ε' [-]	$\Delta \varepsilon'$ [-]
Maxvellův vztah	3,385	0,050
Böttcherův vztah	3,386	0,051
Lichteckerův vztah pro $k = 1$	3,405	0,070
Lichteckerův vztah pro $k = -1$	3,363	0,028
Lichteckerův vztah pro $k = 0$	3,380	0,045
Naměřená hodnota	3,335	0

Z tab. 3.6 je zřejmé, že nejmenší $\Delta \varepsilon'$ je při použití Lichteckerova vztahu pro $k = -1$, proto se jeví jako nejvhodnější pro výpočet takovéto složené soustavy použití rovnice (26). Vzhledem k chaotickému uspořádání laku a slídy v experimentálních vzorcích by měl být vhodnější Lichteckerův logaritmický vztah ($k = 0$). Rozdíl mezi oběma výsledky (3,363 a 3,380) je vzhledem k přesnosti měření prakticky zanedbatelný.

4 ZÁVĚR

Zkoumavý elektroizolační lak TSA 220S je dielektrickým materiálem relaxačního typu. Existence relaxačních polarizací byly prokázány kmitočtovými průběhy obou složek komplexní permitivity i jejich vyjádření prostřednictvím Coleho – Coleho diagramů. Expozicí materiálu v prostředí s rostoucí relativní vlhkostí dochází k růstu relativní permitivity ε' a ztrátového čísla ε'' .

U čistého laku lze předpokládat vysokou provozní stabilitu. Po přidávání slídy vzorky více navlhávají a mají méně stabilní charakter. K dalšímu posouzení vlivu přidávané mleté slídy by bylo vhodné zkoumat další vlastnosti, jako například rezistivitu nebo elektrickou pevnost takto vzniklého materiálu. Pro výpočet kompozitu laku a slídy se jako nejvhodnější jeví použití Lichteckerova mocninného vztahu pro $k = -1$.

Měření dielektrických veličin ovlivňují různé činitele. Vzhledem k možnosti vzniku vzduchovým mezer mezi zkoumaným vzorkem a přiloženými elektrodami je nutné vyrábět vzorky s co nejrovnějším povrchem. Dále je možné vliv vzduchových mezer potlačit pomocí numerických metod. Při experimentech obdobného druhu je nutné zachovávat stejnou polohu vzorku v elektrodovém systému, jinak dochází k rozptylu měřených hodnot. Při zpracování naměřených hodnot je také nutné přihlídnout k chybám přístrojů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ROZSÍVALOVÁ, Z. a kol. *Materiály a technická dokumentace – Laboratorní cvičení: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2004.
- [2] JIRÁK, J., ROZSÍVALOVÁ Z. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy – Laboratorní cvičení: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2003.
- [3] JIRÁK, J. a kol. *Materiály a technická dokumentace – část Materiály v elektrotechnice: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2002.
- [4] *Dielektrikum* [online]. [cit. 2007-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>>.
- [5] KAZELLE, J. a kol. *Výrobní procesy: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2006.
- [6] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha : BEN, 2006, 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [7] KAZELLE, J. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2003.
- [8] LIEDERMANN, K., jun. *Dielektrická relaxační spektroskopie polymerních látek: Habilitační práce*. Brno, VUT FEKT v Brně, 1996.
- [9] BEDNÁŘ, J. *Analýza dielektrických vlastností Thermikanitu v průběhu teplotního stárnutí: Diplomová práce*. Brno : VUT FEKT v Brně, 2006, 60 s.
- [10] PETR, J. *Struktura a vlastnosti materiálů II – Izolanty: Skriptum*. 2. vyd. Praha, ČVUT Praha, 1989, 185 s.
- [11] *Epoxylite TSA 220S: Materiálový list*. Praha, 2003.
- [12] *Mletá slída 60.030: Materiálový list*.
- [13] HP E4980A Precision LCR Meter – *Operation Manual*. Yokogawa – Hewlett – Packard LTD 1989.
- [14] HP 16451B Dielectric Test Fixture – *Operation and Service Manual*. Yokogawa – Hewlett – Packard LTD 1989.
- [15] HASSENDENTEUFEL, J. a kol. *Elektrotechnické materiály*. 2. přepr. vyd. Bratislava : ALFA, 1978, 607s.

- [16] *Elektroizolačné laky a živice* [online]. [cit. 2007-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.vuki.sk/VUKIELAK.HTM>>.
- [17] *Dielectric* [online]. [cit. 2007-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/dielec.html>>.
- [18] JIRÁK, J. a kol. *Diagnostika a zkušebnictví: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2002.
- [19] LIEDERMANN, K. a kol. *Klimatotechnologie: Elektronický učební text*. Brno, VUT FEKT v Brně, 2006.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektrotechnologie

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor: Bc. Přemysl Brož

Název závěrečné práce: Analýza složené soustavy s různým podílem plniva

Název závěrečné práce ENG: Analysis of composite with different proportion of filler

Anotace závěrečné práce: Předkládaná práce se zabývá sledováním složek komplexní permitivity v kmitočtové oblasti elektroizolačních materiálů v průběhu navlhávání pomocí metody dielektrické relaxační spektroskopie.

Anotace závěrečné práce ENG: This work consider with monitoring components of komplex permittivity at frequency section of electro-insulation material in process of wetting by dielectric relaxation spectroscopy.

Klíčová slova: Dielektrikum, impregnační lak, dielektrická relaxační spektroskopie, navlhávání, kompozity.

Klíčová slova ENG: Dielectric, impregnating varnish, dielectric relaxation spectroscopy, wettability, composite.

Typ závěrečné práce: diplomová

Datový formát elektronické verze: formát pdf

Jazyk závěrečné práce: český

Přidělovaný titul: Ing.

Vedoucí závěrečné práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

Škola: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika

Studijní obor: Elektrotechnická výroba a management