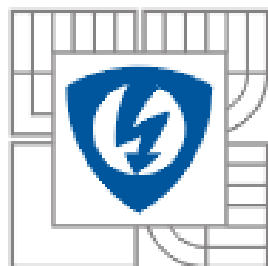


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

SLÍDOU MODIFIKOVANÉ ELEKTROIZOLAČNÍ LAKY

MICA MODIFIED ELECTROINSULATING VARNISHES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

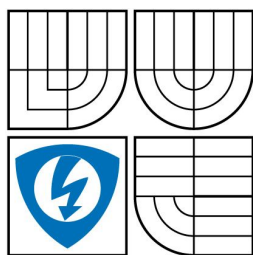
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL MRKOS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Pavel Mrkos **ID:** 83447
Ročník: 2 **Akademický rok:** 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Slídou modifikované elektroizolační laky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte přehled elektroizolačních laků používaných v elektrotechnice. Prostudujte diagnostické metody a možnosti testování vlastností elektroizolačních laků. Navrhněte vhodnou metodiku přípravy a zhotovte sady lakových vzorků s různým podílem plniva v podobě mikromleté slídy. Experimentálně sledujte vliv plniva na změny elektrických vlastností elektroizolačního laku. Dosažené výsledky fyzikálně interpretujte a matematicky vyhodnoťte. Na experimentálně zjištěné průběhy aplikujte směsné vztahy; diskutujte možný přínos mikromleté slídy k dosažení lepších elektroizolačních vlastností soustavy ve srovnání s matricí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt:

Předkládaná diplomová práce se zabývá vlivem obsahu slídy na elektrické vlastnosti elektroizolačních laků, konkrétněji polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102. Zaměřuje se na diagnostické metody a testování vlastností elektroizolačních laků. Zkoumá možný přínos mikromleté slídy k dosažení lepších elektroizolačních vlastností soustavy ve srovnání s matricí. Kompozitní materiál je tvořen polyesterovou pryskyřicí Dolphon XL 2102, která je modifikována různým hmotnostním procentem mikromleté slídy. Výsledkem práce jsou kmitočtové závislosti složek komplexní permitivity kompozitního materiálu.

Abstract:

This master's thesis deals with influence of mica content on the electrical properties of electrical insulating varnishes, particularly in the polyester resin Dolphon XL 2102. It focuses on diagnostic methods and testing the properties of electroinsulating varnishes. Examines the potential benefits of micronised mica in order to achieve better electrical insulation properties of the system compared to the matrix. The composite material consists of polyester resin Dolphon XL 2102, which is modified different mass percentage of micronized mica. The results of this project are frequency dependencies of real and imaginary parts of complex permittivity of varnish component.

Klíčová slova:

Polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102, relativní permitivita, směsné vztahy, slída, stejnosměrné měření, střídavé měření, diagnostické testy

Keywords:

Polyester resin Dolphon XL2102, relative permittivity, mixed relations, mica, DC measurements, AC measurements, diagnostic tests

Bibliografická citace díla:

MRKOS, P. *Slídou modifikované elektroizolační laky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová

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 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zdence Rozsivalové za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Rovněž děkuji Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za poskytnutou pomoc a odborné rady a společnosti FORTRAC s.r.o. za poskytnutí polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102.

OBSAH

ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK	11
1.1.1 <i>Relativní permitivita</i>	12
1.1.2 <i>Vnitřní rezistivita</i>	12
1.1.3 <i>Povrchová rezistivita</i>	12
1.1.4 <i>Ztrátové činitele</i>	13
1.2 DIELEKTRICKÁ POLARIZACE.....	14
1.2.1 <i>Dielektrická polarizace ve střídavém elektrickém poli</i>	14
1.2.2 <i>Dielektrická polarizace ve stejnosměrném elektrickém poli</i>	19
1.2.3 <i>Dielektrické ztráty</i>	20
1.2.4 <i>Elektrická vodivost</i>	21
1.3 ELEKTROIZOLAČNÍ LAKY V ELEKTROTECHNICE.....	22
1.3.1 <i>Rozdělení elektroizolačních laků</i>	23
1.3.2 <i>Polyesterové pryskyřice</i>	23
1.4 SLÍDA.....	23
1.4.1 <i>Slída pro použití v elektrotechnice</i>	24
1.4.2 <i>Slídové výrobky</i>	24
1.4.3 <i>Druhy slídy</i>	24
1.4.4 <i>Vlastnosti slídy</i>	25
1.5 SLOŽENÉ MATERIÁLY	25
1.5.1 <i>Vlastnosti složených materiálů</i>	25
1.5.2 <i>Permitivita složených soustav</i>	26
1.6 DIAGNOSTICKÉ TESTY VLASTNOSTÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH LAKŮ	27
1.6.1 <i>Twisted coil test</i>	27
1.6.2 <i>Helical coil test</i>	28
1.6.3 <i>Wire bundle test</i>	28
2 PRAKTICKÁ ČÁST	30
2.1 ROZBOR POUŽITÉ POLYESTEROVÉ PRYSKYŘICE	30
2.1.1 <i>Polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102</i>	30
2.1.2 <i>Doba vypalování</i>	30
2.2 ROZBOR POUŽITÉ SLÍDY	30
2.3 ROZBOR POUŽITÝCH FOREM PRO VYTVRZENÍ	31
2.4 PŘÍPRAVA VZORKŮ DO TEFLONOVÝCH FOREM	31
2.5 PŘÍPRAVA VZORKŮ NA HLINÍKOVÉ PODLOŽKY	32
2.6 PŘÍPRAVA VZORKŮ DO HLINÍKOVÝCH FOREM	33
2.7 POUŽITÉ MĚŘICÍ METODY A PŘÍSTROJE	38
2.7.1 <i>Střídavá metoda</i>	38
2.7.2 <i>Stejnoseměrná metoda</i>	40
2.8 VÝPOČET SLOŽEK KOMPLEXNÍ PERMITIVITY.....	41
2.8.1 <i>Měření tloušťky vrstvy polyesterové pryskyřice</i>	42
2.8.2 <i>Měření hmotnosti lakových vzorků</i>	43
2.9 VÝSLEDKY A GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	44
2.9.1 <i>Střídavá metoda</i>	44
2.9.2 <i>Stejnoseměrná metoda</i>	48

2.10	MATEMATICKÁ INTERPRETACE SMĚSNÝCH VZTAHŮ	50
3	ZÁVĚR	55
4	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Sériový náhradní obvod kondenzátoru s dielektrikem [8].....	13
Obr. 2 Paralelní náhradní obvod kondenzátoru s dielektrikem [8]	13
Obr. 3 Fázorový diagram elektrické indukce a komplexní permitivity [3]	15
Obr. 4 Průběh složek komplexní permitivity v závislosti na kruhovém kmitočtu.....	17
Obr. 5 Coleho – Coleho kruhový diagram klasického Debyeho průběhu [3]	18
Obr. 6 Stroj pro výrobu zkroucených cívek.....	28
Obr. 7 Příprava svazku vodičů ze smaltovaného drátu – metoda A	29
Obr. 8 Příprava svazku vodičů ze smaltovaného drátu – metoda B.....	29
Obr. 9 Vytvrzené vzorky na hliníkových podložkách.....	32
Obr. 10 Hliníková forma pro přípravu vzorku.....	33
Obr. 11 Horkovzdušný sterilizátor STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu	34
Obr. 12 Hliníkové formy předehřáté na teplotu 80 °C	34
Obr. 13 Navážení polyesterové pryskyřice Obr. 14 Přidání slídy Mica-M	35
Obr. 15 Míchání roztoku pomocí ultrazvukové míchačky	35
Obr. 16 Ustálený roztok.....	36
Obr. 17 Roztok polyesterové pryskyřice a mikromleté slídy Mica-M před vytvrzením.....	36
Obr. 18 Umístění forem v horkovzdušném sterilizátoru STERICELL 55	37
Obr. 19 Vytvrzené vzorky v horkovzdušném sterilizátoru STERICELL 55.....	37
Obr. 20 Vytvrzené vzorky	37
Obr. 21 Zapojení tříelektrodového systému HP 16451B [11].....	38
Obr. 22 Tříelektrodový systém HP 16451B	39
Obr. 23 RLC metr Agilent E4980A [12].....	39
Obr. 24 Elektrometr Keithley 6517A	40
Obr. 25 Tříelektrodový systém Keithley 8009.....	40
Obr. 26 Digitální mikrometr	42
Obr. 27 Digitální váha RADWAG AS 220/C/2 [15]	43
Obr. 28 Kmitočtová závislost relativní permitivity pro vzorky bez příměsi slídy (a), s 4 % příměsi slídy (b), s 8 % příměsi slídy (c)	45

Obr. 29 Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro vzorky bez příměsi slídy (a), s 4 % příměsi slídy (b), s 8 % příměsi slídy (c).....	46
Obr. 30 Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro 0%, 2%, 4%, 6% a 8% vzorky.....	47
Obr. 31 Kmitočtová závislost relativní permitivity pro 0%, 2%, 4%, 6%, 8% vzorky.....	47
Obr. 32 Závislost $\varepsilon' = f(\varepsilon'')$	47
Obr. 33 Časová závislost nabíjecího proudu (a), časová závislost vybíjecího proudu (b).....	48
Obr. 34 Časová závislost nabíjecího proudu (a), časová závislost vybíjecího proudu (b), časová závislost vnitřní rezistivity (c).....	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102	30
Tab. 2 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice bez příměsi slídy.....	42
Tab. 3 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 2 % příměsi slídy	42
Tab. 4 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 4 % příměsi slídy	42
Tab. 5 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 6 % příměsi slídy	42
Tab. 6 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 8 % příměsi slídy	42
Tab. 7 Tabulka hmotností jednotlivých vzorků	43
Tab. 8 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 2 % příměsi slídy	52
Tab. 9 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 4 % příměsi slídy	52
Tab. 10 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 6 % příměsi slídy	53
Tab. 11 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 8 % příměsi slídy	53
Tab. 12 Přehled průměrných hodnot lakových vzorků s různým podílem plniva	54

SEZNAM SYMBOLŮ

C_0	(F)	geometrická kapacita
C_x	(F)	naměřená kapacita
c	(m)	šířka vzduchové mezery mezi stínicí a měřicí elektrodou tříelektrodového systému
d_m	(m)	průměr měřicí elektrody
E	(V m ⁻¹)	intenzita elektrického pole mezi elektrodami před vsunutím dielektrika
E'	(V m ⁻¹)	intenzita elektrického pole mezi elektrodami po vsunutí dielektrika
f	(Hz)	kmitočet
h	(m)	tloušťka vzorku
m	(kg)	hmotnost
$\text{tg}\delta$	(-)	ztrátový činitel
ρ	(Ω m)	rezistivita
V	(m ³)	objem
v_1	(-)	objemový podíl elektroizolačního laku
v_2	(-)	objemový podíl slídy
ϑ	(°C)	teplota
γ	(S m ⁻¹)	konduktivita
γ_p	(S)	povrchová konduktivita
γ_v	(S m ⁻¹)	vnitřní konduktivita
δ	(rad)	ztrátový úhel
$\varepsilon' = \varepsilon_r$	(-)	relativní permitivita (reálná složka komplexní permitivity)
ε''	(-)	ztrátové číslo (imaginární složka komplexní permitivity)
ε_0	(F m ⁻¹)	permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F m ⁻¹)

Úvod

V současné době se v elektrotechnickém průmyslu používají stále více izolanty, tedy nevodivé materiály. Při výrobě těchto materiálů je kladen velký důraz na jejich vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří zejména odolnost proti působení klimatických činitelů a elektrická odolnost izolantu. Mezi hlavní požadavky na provoz elektrických zařízení se řadí vysoká spolehlivost a bezpečnost. Všechny tyto vlastnosti závisejí na kvalitě a životnosti elektroizolačního systému každého zařízení.

Elektroizolační materiály jsou vystavovány podmínkám, které mají vliv na přesnost a kvalitu elektrických vlastností. Elektrické, mechanické a tepelné namáhání výrazně ovlivňují spolehlivost a životnost elektroizolačních systémů. Proto byly vyvinuty diagnostické metody pro sledování stavu elektroizolačních systémů. Tím, že budeme měřit a sledovat životnost elektroizolačního systému, včas zjistíme případný havarijný stav izolantu a zabráníme poškození výrobku. V oboru diagnostiky se v dnešní době nejvíce využívají nedestruktivní elektrické metody. Při využití těchto metod není měřený objekt žádným způsobem ovlivněn ani poškozen.

Tato diplomová práce se zaměřuje na zkoumání účinků vlivu obsahu mleté slídy na elektrické vlastnosti impregnačních laků. Zkoumá technologii přípravy lakových vzorků s různými hmotnostními podíly mikromleté slídy a vliv přidané slídy na vlastnosti lakových vzorků. Součástí diplomové práce je zpracování přehledu elektroizolačních laků které se používají v elektrotechnickém průmyslu. Na základě provedeného rozboru diagnostických metod a možnosti testování vlastností elektroizolačních laků byla navržena metodika přípravy lakových vzorků a podle navržené metodiky byla vyrobena sada lakových vzorků s různým obsahem plniva v podobě mikromleté slídy. Experimentálně byl sledován vliv plniva na změny elektrických vlastností elektroizolačního laku. Dosažené výsledky byly fyzikálně interpretovány a matematicky vyhodnoceny pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel. Na experimentálně zjištěné průběhy byly aplikovány směsné vztahy. Součástí diplomové práce je i diskuse o možném přínosu mikromleté slídy k dosažení lepších elektroizolačních vlastností soustavy ve srovnání s maticí.

1 Teoretická část

1.1 Dielektrické vlastnosti látek

Za ideální dielektrikum je považována látka složená z nábojů, které jsou vázány elektrostatickými silami a které neobsahují volně pohyblivé elektrické náboje. Pokud na tuto látku působí vnější elektrické pole, neprochází látkou žádný elektrický proud. V této látce nevznikají ztráty energie a elektrická vodivost látky je tudíž nulová. V souvislosti s dielektrikem hovoříme také o polarizovatelnosti jeho nábojů. Po přiložení elektrického pole je materiál schopen akumulovat elektrickou energii. Ideální dielektrikum neobsahuje volné nosiče elektrických nábojů, proto by takové dielektrikum bylo schopné udržet elektrostatické pole po neomezeně dlouho dobu. V praxi takovéto látky neexistují. Všechna používaná dielektrika obsahují relativně velmi malá množství volných nábojů. Každé reálné dielektrikum je tedy v nepatrné míře vodivé. Měrná vodivost dielektrika je menší než 10^{-10} S cm. Každý izolant je zároveň dielektrikem, ale ne všechna dielektrika jsou izolanty. O izolantu se hovoří v souvislosti se schopností látky vzájemně izolovat od sebe vodivé části s různým potenciálem. [3]

Dielektrikum je látka, která je schopná akumulovat elektrickou energii. Izolant je zase látka schopná elektrickou energii izolovat. Mezi základní fyzikální jevy v těchto látkách se řadí zejména dielektrická polarizace, elektrická vodivost, dielektrické ztráty a elektrický výboj.

Základní elektrické veličiny těchto fyzikálních jevů jsou:

relativní permitivita	ε'	(-)
vnitřní rezistivita	ρ_v	(Ω m)
povrchová rezistivita	ρ_p	(Ω)
ztrátový činitel	$\text{tg}\delta$	(-)
elektrická pevnost	E_p	(V m^{-1}).

Dielektrika se skládají z atomů, molekul a iontů. Molekuly se z hlediska způsobu uspořádání vázaných nábojů dělí na molekuly polární a nepolární (dipólové a neutrální). Molekuly polární mají nesymetrickou stavbu a charakterizují se stálým elektrickým momentem i bez přítomnosti elektrického pole. Po přiložení elektrického pole se dipólové molekuly natáčí ve směru tohoto elektrického pole. Molekuly nepolární mají zcela symetrickou vazbu, vázané elektrické náboje jsou rozloženy souměrně a jejich těžiště splývají. Při vložení do elektrického pole dojde k porušení symetrie - nepolární molekula vytvoří elektrický dipól a nabude indukovaný elektrický moment.

1.1.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita ε' je bezrozměrná fyzikální veličina přímo související s polarizací. Relativní permitivita je činitel úměrnosti mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole, přičemž je závislá na kmitočtu působícího elektrického pole a teplotě. Jak kmitočtová, tak i teplotní závislost relativní permitivity se liší podle druhu materiálu. Hodnota relativní permitivity se vzrůstajícím kmitočtem klesá, na rozdíl od závislosti na teplotě, kdy může dojít k nárůstu i poklesu. Relativní permitivita se stanoví z poměru dvou kapacit ze vztahu (1)

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

kde C_x je kapacita kondenzátoru s vloženým dielektrikem, C_0 kapacita vakuového kondenzátoru stejných geometrických rozměrů, kterou lze spočítat podle vztahu (2)

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S_{ef}}{h}, \quad (2)$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$), S_{ef} efektivní plocha měřicí elektrody a h je vzdálenost elektrod, resp. tloušťka měřeného vzorku. [8]

1.1.2 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita vyjadřuje míru vodivosti daného materiálu. Je to také reciproká hodnota vnitřní konduktivity. Vnitřní rezistivita se vypočte ze vztahu (3)

$$\rho_v = \frac{R_v S_{ef}}{h}, \quad (3)$$

kde R_v je vnitřní elektrický odpor, S_{ef} efektivní plocha měřicí elektrody a h tloušťka vzorku. [8]

1.1.3 Povrchová rezistivita

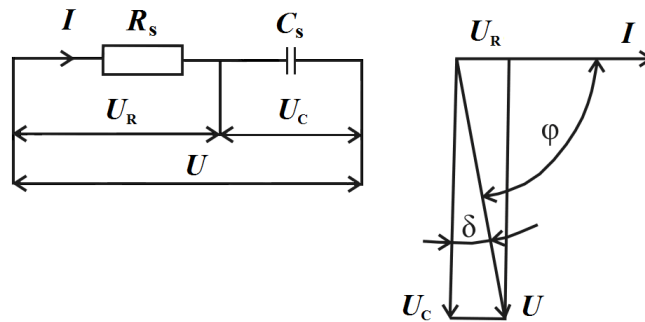
Povrchová rezistivita vyjadřuje míru vodivosti daného materiálu. Je to také reciproká hodnota povrchové konduktivity. Povrchová rezistivita se vypočte ze vztahu (4)

$$\rho_p = R_p \frac{a}{c}, \quad (4)$$

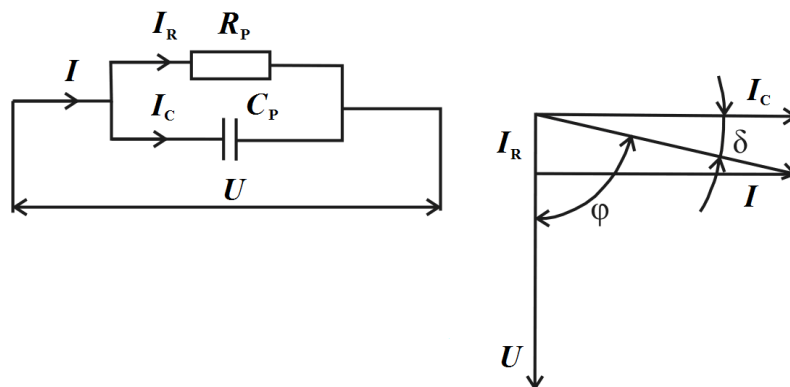
kde R_p je povrchový elektrický odpor, a obvod efektivní plochy měřicí elektrody a c je vzdálenost mezi měřicí a ochrannou elektrodou. [8]

1.1.4 Ztrátové činitele

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je mírou dielektrických ztrát a přímo souvisí se ztrátovým úhlem δ , což je úhel doplňující fázový úhel φ , mezi napětím a proudem, do 90° . Ztrátový činitel je tedy vyjádřením množství ztrát, ke kterým dojde při polarizaci dielektrika, v důsledku vodivosti a ionizace. Stejně jako relativní permitivita je ztrátový činitel bezrozměrná veličina, kmitočtově a teplotně závislá. Tyto závislosti se stanovují z náhradního sériového nebo paralelního zapojení.



Obr. 1 Sériový náhradní obvod kondenzátoru s dielektrikem [8]



Obr. 2 Paralelní náhradní obvod kondenzátoru s dielektrikem [8]

U sériového zapojení (viz obr. 1) se ztrátový činitel vypočte ze vztahu (5)

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s, \quad (5)$$

kde C_s je kapacita sériového náhradního zapojení a R_s odpor sériového náhradního zapojení.

Pro případ paralelního náhradního zapojení (viz obr. 2) platí vztah (6)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p}, \quad (6)$$

kde C_p je kapacita v paralelním náhradním zapojení a R_p odpor v paralelním náhradním zapojení. [8]

Elektrická pevnost E_p je schopnost materiálu odolávat působení vnějšího elektrického pole do doby, než dojde k čistě elektrickému nebo tepelnému průrazu. Je ovlivněna mnoha faktory, jako např. kmitočtem, teplotou, dobou působení elektrického pole, čistotou prostředí, rychlostí nárůstu elektrického napětí atd. Elektrická pevnost je dána vztahem (7)

$$E_p = \frac{U_p}{h}, \quad (7)$$

kde U_p je průrazné napětí a h tloušťka vzorku. [8]

1.2 Dielektrická polarizace

Fyzikální jev, při němž se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole přemisťují elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových na malé omezené vzdálenosti, a obsahuje-li látka dipólové molekuly, natáčejí se (orientují se) do směru pole. Výjimečně jsou i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace. Mírou polarizace jsou vektor polarizace P a relativní permitivita ϵ' , která souvisí se schopností polarizace látky – polarizovatelností. 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
- jevy s pomalým průběhem, tzv. relaxační polarizace.

1.2.1 Dielektrická polarizace ve střídavém elektrickém poli

Působí-li na dielektrikum střídavé elektrické pole, jehož intenzita $\vec{E}(t)$ má časový průběh, který je vyjádřen rovnicí (8)

$$\vec{E}(t) = \vec{E} \cos \omega t, \quad (8)$$

kde \vec{E} je amplituda intenzity vnějšího elektrického pole, t čas a $\omega = 2\pi f$ kruhový kmitočet, projeví se dynamické vlastnosti dielektrika.

Elektrická indukce $\vec{D}(t)$ je při dostatečné době působení elektrického pole rovněž periodickou funkcí času se stejným kmitočtem. Následkem dielektrické relaxace se indukce $\vec{D}(t)$ vždy zpožďuje za vektorem intenzity elektrického pole $\vec{E}(t)$. Díky tomu fázor $\vec{D}(t)$ není ve fázi s $\vec{E}(t)$. Mezi veličinami \vec{E} a \vec{D} je v obecném případě ztrátový úhel δ . Elektrická indukce \vec{D} a ztrátový úhel δ jsou veličiny, které jsou kmitočtově závislé.

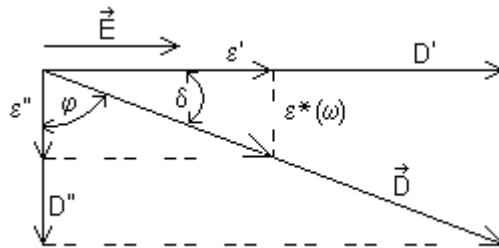
Časové opožďování veličiny \vec{D} za \vec{E} je dáno vztahem (9)

$$\vec{D}(t) = \vec{D} \cos(\omega t - \delta), \quad (9)$$

Veličiny \vec{D} a \vec{E} jsou vzájemně úměrné a konstanta úměrnosti je komplexní permitivita $\varepsilon^*(\omega)$. To je vyjádřeno vztahem (10)

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

kde ε_0 je absolutní permitivita vakua. Permitivita dielektrika $\varepsilon^*(\omega)$ je komplexní veličinou se složkami ε' a ε'' ; fázorový diagram komplexní permitivity $\varepsilon^*(\omega)$ je uveden na obr. 3.



Obr. 3 Fázorový diagram elektrické indukce a komplexní permitivity [3]

Při známém časovém průběhu elektrické indukce $\vec{D}(t)$ lze vyjádřit i časový průběh vektoru polarizace $\vec{P}(t)$. To je vyjádřeno rovnicí (11)

$$\vec{P}(t) = \vec{D}(t) - \varepsilon_0 \vec{E}(t), \quad (11)$$

Elektrická indukce $\vec{D}(t)$ má dvě složky; složka D' je ve fázi s působícím elektrickým polem a složka D'' se zpožďuje o úhel $\pi/2$. Pro obě složky platí:

$$D' = \vec{D} \cos \delta = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \vec{E} \cos \delta = \varepsilon_0 \varepsilon' \vec{E}, \quad (12)$$

$$D'' = \vec{D} \sin \delta = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \vec{E} \sin \delta = \varepsilon_0 \varepsilon'' \vec{E}, \quad (13)$$

Konstanta úměrnosti ε' ve vztahu (12) představuje reálnou složku komplexní permitivity, konstanta úměrnosti ε'' ve vztahu (13) vyjadřuje imaginární složku téže veličiny. Obě složky komplexní permitivity jsou kmitočtově závislé veličiny. Z fázorového diagramu (viz obr. 3) plyne, že komplexní permitivitu lze vyjádřit ve tvaru (14)

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (14)$$

Z obr. 3 dále plynou vztahy (15) a (16)

$$\varepsilon' = \varepsilon^*(\omega) \cos \delta, \quad (15)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon^*(\omega) \sin \delta, \quad (16)$$

Úhel δ udává míru dielektrických ztrát a bývá nazýván ztrátovým úhlem; jeho tangenta je nazývána ztrátovým činitelem ($\operatorname{tg}\delta$). To je vyjádřeno vztahem (17)

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (17)$$

odkud imaginární část komplexní permitivity ε'' , označována jako ztrátové číslo, je dána výrazem (18)

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg}\delta. \quad (18)$$

Debye teoreticky odvodil pro komplexní permitivitu vztah (19)

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (19)$$

kde τ představuje relaxační dobu dielektrika, která je funkcí teploty, ε_s je statická relativní permitivita a ε_∞ je optická relativní permitivita. U optické permitivity se uplatňuje pouze polarizace elektronová, protože částice dielektrika již nestačí sledovat velmi rychlé změny elektrického pole. Pomalé polarizace se zde již nemohou uplatnit.

Rozložením rovnice (18) na reálnou a imaginární část, vyplývají pro složky ε' a ε'' vztahy (20) a (21)

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (20)$$

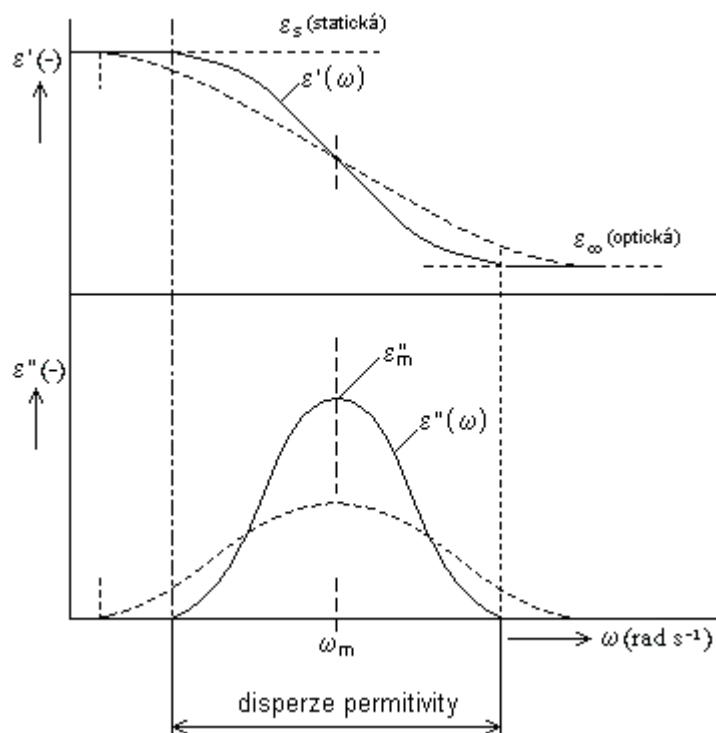
$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (21)$$

Dosažení vztahů (19) a (20) do rovnice (17) získáme vztah (22) pro ztrátový činitel

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty + \omega^2\tau^2}, \quad (22)$$

Vztahy (19), (20) a (21) bývají v literatuře označovány jako Debyeho rovnice.

Vynesení grafických závislostí $\varepsilon' = f(\omega)$ a $\varepsilon'' = f(\omega)$, popsanych rovnicemi (19) a (20), získáme průběhy kvalitativně shodné s křivkami uvedenými na obr. 4. Zde ε' s rostoucím kmitočtem plynule klesá z nejvyšší hodnoty ε_s (statické) na nejnižší hodnotu ε_∞ (optickou).



Obr. 4 Průběh složek komplexní permitivity v závislosti na kruhovém kmitočtu

————— pro případ jedné relaxační doby

----- pro případ rozptylu relaxačních dob [3]

Závislost $\varepsilon'' = f(\omega)$ prochází maximem v místě nejpráhřejšího poklesu funkce $\varepsilon'(\omega)$. Dielektrické ztráty mizí při limitních kmitočtech, tj. $\omega \rightarrow 0$ a $\omega \rightarrow \infty$, kdy se kondenzátor s technickým dielektrikem chová jako ideální kapacita. Oblast, v níž relativní permitivita klesá s kmitočtem, se nazývá oblastí dielektrické disperze (nebo také oblastí disperze permitivity). Závislosti uvedené na obr. 4 je nazývána jako Debyeho průběh závislosti $\varepsilon(\omega)$ na kmitočtu. Platí pro všechna dielektrika s relaxačními polarizacemi.

Maximum ztrátového čísla ε''_m nastane při kruhovém kmitočtu ω_m . Z podmínky $\frac{d\varepsilon''}{d\omega} = 0$ vyplývá při konstantní teplotě (23)

$$\omega_m \tau = 1, \quad (23)$$

Dosazením rovnice (23) do rovnic (19), (20) a (21) získáme pro veličiny ε'_{inf} , ε''_m a $\text{tg } \delta_a$ vztahy: (24), (25) a (26)

$$\varepsilon'_{inf} = \frac{1}{2}(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty), \quad (24)$$

$$\varepsilon''_m = \frac{1}{2}(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty), \quad (25)$$

$$\operatorname{tg} \delta_a = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}, \quad (26)$$

Ze vztahů (24), (25) a (26) je zřejmé, že veličiny ε' , ε'' a $\operatorname{tg} \delta_a$ nezávisí na hodnotě ω_m .

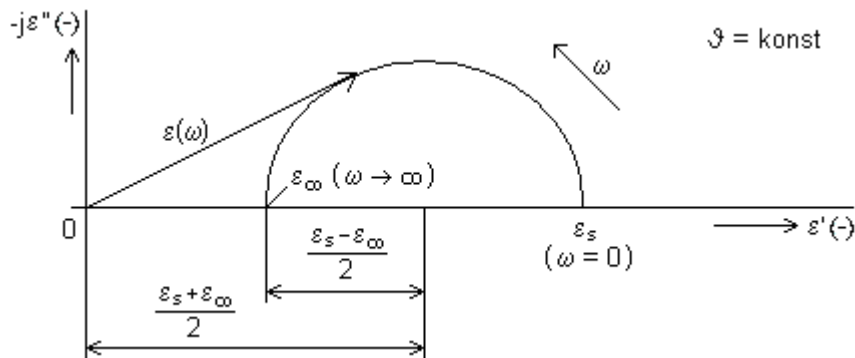
Coleho-Coleho kruhový diagram

Vyloučením součinu $\omega\tau$ z Debyeho rovnic, viz [10], se dospěje k rovnici kružnice v analytickém tvaru (27)

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right)^2, \quad (27)$$

Kružnice vyjádřená vztahem (27) má poloměr $r = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}$ a souřadnice středu $\left[\frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2}; 0 \right]$.

Grafické zobrazení rovnice (27) je uvedeno na obr. 5, tedy Coleho-Coleho diagram. Pokud jsou hodnoty ε' a ε'' vyneseny v komplexní rovině, pak koncové body $\varepsilon^*(\omega)$ vytváří kruhový oblouk, který protíná reálnou osu ε' v bodech ε_s a ε_∞ . [10]



Obr. 5 Coleho – Coleho kruhový diagram klasického Debyeho průběhu [3]

1.2.2 Dielektrická polarizace ve stejnosměrném elektrickém poli

Obsahuje-li látka dipólové molekuly, orientují se tyto molekuly ve směru elektrického pole. Schopnost polarizace látky, zvaná také jako polarizovatelnost α , je základní fyzikální vlastností dielektrik. S touto vlastností souvisí hodnota relativní permitivity dielektrik ε' a ztrátového činitele $\operatorname{tg}\delta$. S těmito veličinami korespondují dielektrické ztráty, stárnutí organických dielektrik a následně jejich životnost. Proto velikost ε' a $\operatorname{tg}\delta$ je za různých podmínek základním kritériem při volbě materiálu k výrobě izolací pro konkrétní aplikace. Velikost indukovaného dipólového momentu je úměrná velikosti intenzity působícího lokálního elektrického pole E_1 a je dána vztahem (28)

$$\vec{\mu}_i = \alpha \vec{E}_1, \quad (28)$$

kde α je polarizovatelnost. Lokální (vnitřní) elektrické pole je pole bezprostředně působící na danou polarizovatelnou částici. Intenzita tohoto pole je vždy větší než intenzita elektrického pole makroskopického. Dielektrická polarizace představuje vektorový součet všech indukovaných dipólových momentů molekul. Platí rovnice (29)

$$\vec{P} = \frac{\sum_i \vec{\mu}_i}{V} = n \alpha \vec{E}_1, \quad (29)$$

kde n je koncentrace polarizovatelných částic.

Míra polarizace dielektrika se hodnotí podle změny kapacity kondenzátoru při záměně vakua nebo vzduchu mezi deskami kondenzátoru za analyzovaný materiál. Platí rovnice (30)

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (30)$$

kde χ je dielektrická susceptibilita.

Veličiny E , D a P jsou obecně vektorové, v izotropním dielektriku však stačí pouze pojetí skalární. Nejběžnější jsou dielektrika lineární, pro která je polarizace přímo úměrná intenzitě elektrického pole. Platí rovnice (31)

$$D = \varepsilon_0 E + \chi \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon' E, \quad (31)$$

U nelineárních dielektrik závisí ε' i na intenzitě přiloženého elektrického pole, zpravidla je však funkcí teploty a kmitočtu elektrického pole, eventuálně i dalších činitelů. [9]

Klasifikace polarizačních mechanismů

a) Polarizace rychlé – nezávisí na kmitočtu, mají krátkou dobu trvání, probíhají beze ztrát.

- 1) Polarizace elektronová – vyskytuje se u všech dielektrik, probíhá beze ztrát, nezávisí na teplotě.
- 2) Polarizace iontová-pružná – vyskytuje se jen u iontových krystalů, probíhá beze ztrát, je závislá na teplotě.

b) Polarizace pomalé – polarizace přibývají velmi pomalu, závisejí na teplotě a na kmitočtu a jsou vždy provázeny ztrátami.

- 1) Polarizace dipólová – vyskytuje se u polárních látek.
- 2) Polarizace iontová-relaxační – vyskytuje se v iontových látkách.

c) Polarizace zvláštní

- 1) Polarizace mezivrstevová (migrační).
- 2) Polarizace samovolná (spontánní).
- 3) Polarizace trvalá (permanentní).
- 4) Polarizace rezonanční – vyskytuje se u všech dielektrik, projevuje se ve viditelném spektru kmitočtů. [1]

1.2.3 Dielektrické ztráty

Technické dielektrikum vykazuje oproti ideálnímu nenulovou elektrickou vodivost, dále často obsahuje nečistoty, příměsi, vlhkost. Přiložené elektrické pole pak podmiňuje vznik nestacionárních pochodů uvnitř dielektrika, které vedou ke ztrátám energie. Ztráty v dielektriku představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce při jeho vložení do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení stejnosměrného i střídavého pole, jsou provázeny ohřevem dielektrika a jsou příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem. Z hlediska fyzikální podstaty se ztráty v dielektriku rozdělují na vodivostní ztráty (u všech dielektrik, podmíněny vnitřní a povrchovou vodivostí), ztráty polarizační (kmitočtové a teplotní charakteristiky ztrát vycházejí z druhu polarizace v dielektriku) a ionizační ztráty (u plynů, tuhých a kapalných dielektrik, které plyny obsahují).

Velikosti dielektrických ztrát vyjadřují tyto veličiny:

ztrátový úhel	δ	(°)
ztrátový činitel	$\text{tg}\delta$	(-)
ztrátové číslo	ε''	(-)
měrné dielektrické ztráty	p	(W kg ⁻¹) [1]

1.2.4 Elektrická vodivost

Mechanismus elektrické vodivosti spočívá v pohybu volných nebo slabě vázaných nábojů v elektrickém poli. Elektrickou vodivost lze rozdělit podle druhu nosičů nábojů na iontovou (ionty příměsí, nečistot, ionty vlastní látky), elektronovou (v elektrických polích o velmi vysoké intenzitě) a elektroforetickou (nosiči jsou koloidní částice v kapalných látkách). Dále lze elektrickou vodivost dielektrických látek rozdělit podle povahy na vnitřní a povrchovou, přičemž povrchovou vodivost lze pozorovat pouze u tuhých látek.

Vnitřní konduktivita γ_v (S m⁻¹) je pro jeden druh nosičů dána vztahem (32).

$$\gamma_v = n q \mu, \quad (32)$$

kde n je koncentrace nosičů elektrického náboje, q je elektrický náboj nosiče a μ je driftová pohyblivost. Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů závisí na jejich chemickém složení, struktuře látek, defektech vnitřního uspořádání a na druhu a obsahu nečistot a příměsí.

Povrchová konduktivita γ_p se udává jako podíl proudu tekoucího po povrchu dielektrika, připadajícího na jednotku délky elektrody I_p a intenzity elektrického pole E . Vztah pro výpočet povrchové elektrické vodivosti je vyjádřen v rovnici (33)

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E}. \quad (33)$$

Pokud se bude jednat o prostorový děj, lze vztah upravit na rovnici (34)

$$\gamma_p = \frac{I}{l_e} \frac{d}{U} = \frac{I}{U} \frac{d}{l_e}, \quad (34)$$

kde I je celkový proud tekoucí po povrchu izolantu, U je napětí na elektrodách, d je jejich vzdálenost a l_e je délka elektrod na povrchu izolantu.

Ze vztahu vyplývá, že i povrchovou elektrickou vodivost lze hodnotit na základě povrchové konduktivity, jak je vyjádřeno v rovnici (35)

$$\rho_p = R_p \frac{l_e}{d}, \quad (35)$$

kde R_p je povrchový elektrický odpor materiálu naměřený mezi paralelními elektrodami. Povrchová elektrická vodivost izolantu je dána pohybem volných nosičů elektrického náboje na jeho povrchu. Volné nosiče náboje vznikají především disociací molekul nečistot na povrchu izolantu, přičemž je disociace silně podporována absorbovanou vlhkostí. [4]

1.3 Elektroizolační laky v elektrotechnice

Elektroizolační laky používáme především pro vyplnění všech volných míst v izolaci elektrotechnických zařízení při jejich impregnaci vytvořením suchého lakového povlaku s nepatrnou hydroskopičností. Díky tomu má izolace vyšší elektrickou pevnost a zlepší se i její tepelná vodivost. Před použitím necháváme laky schnout, nebo je vypalujeme. Nejprve je třeba z laku odstranit rozpouštědla a ředidla. V dalším kroku právě schnutím a vypalováním mění filmotvorné složky laku svoji chemickou strukturu a oxidací přecházejí v pevnou makromolekulární látku. Vhodné hustoty laků se dosahuje ředidly, což jsou látky podobné rozpouštědlům. V menší míře jsou v lacích obsažena i zvláčňovadla neboli změkčovadla (plastifikátory), urychlovače (sikativy), umožňující rychlejší zasychání laků, a někdy i pigmenty dodávající laku určitou barvu. Aby izolační lak splnil požadované podmínky, musí vykazovat dobré mechanické, chemické i elektrické vlastnosti. Po vytvrzení má lakový film mít dobrou tepelnou vodivost, vysokou rezistivitu, malé dielektrické ztráty, velkou elektrickou pevnost, dostatečnou odolnost proti oděru a proti rozpouštědlům.

Vytvrzování laků se děje různými pochody. U některých laků se tvoří pevný film čistým odpařením rozpouštědel (laky lihové), u jiných dochází k vytvrzení oxidací, kdy přijímaným kyslíkem nastává prostorové zesíťování lineárních makromolekul (laky olejové). U dalších laků dochází při zvýšené teplotě, popř. i zvýšeném tlaku, k zesíťování čistou polymerizací, popř. polykondenzací (např. laky fenolické). Poslední skupinou jsou laky, u kterých dochází k vytvrzení polyadící i polymerizací pryskyřice s přidaným tvrdidlem, tzv. laky bezrozpouštědlové (nenasyčené polyestery nebo epoxidové pryskyřice). Při vytvrzování laků nastává vypaření ředidla povrchových vrstev, v nichž se začíná vytvářet gel. Tím pak difunduje dále rozpouštědlo a dochází ke změně struktury lakového filmu. [6]

Elektroizolační laky jsou důležitou kategorií ochranných materiálů, které přispívají k efektivnímu využívání elektrické energie v elektrických a elektronických zařízeních. Složení elektroizolačních laků se během jejich vývoje měnilo. Elektroizolační laky se postupně adaptovaly pro použití v nejnovějších elektronických zařízeních. Složení elektroizolačních laků se muselo podstatně změnit kvůli ochraně životního prostředí. Národní asociace výrobců elektrotechnických zařízení (NEMA), vymezila elektroizolační laky takto: „Jedná se o přírodní nebo syntetické pryskyřice a modifikátory, které jsou po odpaření rozpouštědla chemickou cestou přeměněny do formy pevného filmu.“ [16]

1.3.1 Rozdělení elektroizolačních laků

Elektroizolační laky lze rozdělit:

1) podle chemické povahy filmotvorných složek:

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

2) podle použití:

- a) impregnační laky pro izolanty s vláknitou strukturou
- b) impregnační laky pro vinutí
- c) ochranné laky pro desky plošných spojů
- d) laky na dráty
- e) lepicí laky a povrchové laky.

1.3.2 Polyesterové pryskyřice

Jedná se o bezrospouštědlové laky, jejichž filmotvornou složkou jsou syntetické pryskyřice. Polyesterové pryskyřice patří v rozdělení izolantů do skupiny reaktoplastů, kompozitů – složených materiálů, představujících směsnou soustavu, schopných vytvářet prostorové struktury. [6]

1.4 Slída

Slídy představují skupinu hlinitokřemičitanů s fylosilikátovou strukturou. Mají dokonalou štěpnost, vynikající elektroizolační i tepelně izolační vlastnosti, jsou pružné a chemicky stálé. Vyznačují se značnou stabilitou, tzn. neměnností charakteristických vlastností s časem díky iontové vazbě. Slída je výborným izolantem, její ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ se pohybuje v rozmezí 10^{-3} - 10^{-4} . Vnitřní rezistivita ρ_v odpovídá hodnotě $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$. Při dobývání slídy se dbá především na co nejmenší porušení krystalů. Slída očištěná zhruba od hlušin se nazývá surová, bloková či kusová. Po odstranění vadných krystalů se slída štípe. Štípaná slída se třídí podle velikosti plochy. Hodnotí se, jak podle velikosti listů, tak podle jakosti, tzn. podle obsahu cizích těles a barevných skvrn. Velikost lístků je rozdělena do základních skupin podle plochy největšího obdélníku, který lze z plátku vyříznout (od 6,5 až do 645 cm²). Podle zpracování lze slídu rozdělit na surovou, štípanou, slídový prach a slídu upravenou, tzv. remiku. Krystalická struktura slídy umožňuje její výbornou štípatelnost a lze dosáhnout tloušťky slídových plátků až 0,005 mm. Slídové plátky jsou ohebné a pružné,

chemicky stálé a mechanicky pevné. Jelikož olej vniká mezi slídové plátky, nelze slídových výrobků používat v elektrotechnických výrobcích plněných olejem. [6]

1.4.1 Slída pro použití v elektrotechnice

MUSKOVIT, nazývaný též draselná slída, je kyselý křemičitan hlinitodraselný základního složení $\text{KH}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3$. Je bezbarvý nebo jen mírně růžový, popř. hnědý i zelený podle oxidů, které jsou v něm obsaženy. Je ohebný, mechanicky pevný, použitelný do teploty 500 až 600 °C. Při vyšších teplotách uniká krystalická voda a slída ztrácí průhlednost, křehne a rozrušuje se [1].

Pro dobré elektrické vlastnosti, vysokou permitivitu ($\epsilon_r = 6$ až 7) a nízké ztrátové číslo, které se téměř nemění v širokém rozmezí teplot a kmitočtů, používá se muskovitu jako dielektrika v kondenzátorech. Pro vysokou elektrickou pevnost je pak důležitým izolačním materiálem v elektrických strojích.

FLOGOPIT, tzv. hořečnatá slída, je kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý základního složení $\text{KH}(\text{MgF})_3\text{MgAl}(\text{SiO}_4)_3$. Barvy je jantarové, zlatavé popř. zelené až šedivé, která se podle příměsí opět mění. Flogopit má v porovnání s muskovitem nižší elektrickou vodivost a větší tepelnou stálost při vyšších provozních teplotách. Může se ho použít až do 800 °C. Teprve na 900 °C se tepelně rozrušuje a křehne. Vyšší tepelná stabilita oproti muskovitu je způsobena nahrazením hydroxylových skupin atomy fluóru. Je měkčí a ohebnější než muskovit. [6]

1.4.2 Slídové výrobky

Elektroizolační materiály na bázi slídy se dělí do dvou základních skupin, a to na mikanity a materiály z rekonstruované slídy. V mikanitech je slída aplikována v základní formě slídových lístků. Remikanity jsou aplikací slídy v rekonstruované podobě ve formě tzv. slídového papíru. Pro uvedené materiály je podkladovým materiálem papír, dnes už většinou skleněná tkanina. Oba komponenty jsou k sobě fixovány pojivem ve formě syntetické pryskyřice. V moderní izolační technice se používají dvě formy systémů

- resin-rich (obsahující pryskyřici)
- VPI (vakuově tlaková impregnace).

1.4.3 Druhy slídy

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

1.4.4 Vlastnosti slídy

Elektrické: vysoká dielektrická pevnost, vysoký povrchový a vnitřní odpor, schopnost odolávat jiskření a koroně.

Mechanické: vysoká pevnost ve stříhu a tlaku, pružnost, dokonalá štěpnost, tvarová stálost a nestlačitelnost.

Tepelné: je nenavlhavá, netavitelná, nezápalná s nízkou tepelnou vodivostí, tepelný izolant s vynikající tepelnou stabilitou, zachovává si své vlastnosti do 800 °C.

Optické: v tenkých šupinkách je transparentní, má vysoký lesk, odpuzuje nečistoty a snadno se očišťuje.

Chemické: stabilita a inertnost k vodě, olejům, ředidlům, kyselinám (mimo HF) i jiným chemickým činidlům. [6]

1.5 Složené materiály

V oblasti elektrotechniky se stále častěji používají nové materiály, které jsou tvořeny ze dvou či více směsných materiálů různého chemického složení, jejichž geometrické útvary jsou spojeny v celém objemu materiálu. Tyto materiály jsou označovány jako složené, směsné.

1.5.1 Vlastnosti složených materiálů

Vlastnosti složených materiálů jsou prioritně závislé na vlastnostech použitých surovin, avšak výrazně závisí na množství složek, geometrickém tvaru a orientaci částic složek, uspořádání a rozložení v soustavě. Složené materiály jsou tříděny podle několika odlišných aspektů, a to z hlediska uspořádání jednotlivých složek v soustavě, z hlediska geometrického tvaru částic, z hlediska směrovosti vlastní soustavy a mechanismu zpevnění soustavy.

Z hlediska uspořádání se složené materiály dělí na **matriční** a **statistické** složené soustavy.

Je-li brán zřetel na geometrický tvar částic tvořící složenou soustavu, rozdělujeme složené materiály podle následujícího klíče:

- 1) vrstevnaté složené materiály
- 2) složené materiály s vláknitými plnivý
- 3) složené materiály plněné částicemi.

V otázce směrovosti směsných soustav je potřeba tuto směrovost zvýraznit, nebo naopak potlačit, a to podle okolností. To se řeší volbou soustavy, materiálu a orientací částic soustavy. Proto jsou složené materiály děleny na materiály s izotropními a anizotropními vlastnostmi. [2]

1.5.2 Permittivita složených soustav

Permittivitu složené soustavy lze vypočítat pomocí několika vztahů. Ideální je pracovat se středními prostorovými hodnotami elektrické indukce a intenzity elektrického pole. Vycházeli se z těchto středních hodnot, lze pro sledovaný případ částic kulového tvaru vyjádřit permittivitu soustavy ε'_s rovnicí (36)

$$\varepsilon'_s = \varepsilon'_2 \left[1 + v_1 \left(\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} - 1 \right) \frac{3\varepsilon'_{ef}}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_{ef}} \right], \quad (36)$$

Rovnici (36) lze považovat za všeobecný směsný vztah, který lze převést do tvaru (37)

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_{ef}}{\varepsilon'_2} \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_{ef}}, \quad (37)$$

Výpočet permittivity ε'_s dosazením $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_2$ nebo $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_s$ do rovnice (37) je důsledkem aproximativního přístupu výpočtu a neodpovídá v obecném případě skutečnosti.

V Maxwellově přístupu je použita aproximace $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_2$. Maxwellův směsný vztah [2] je znázorněn v rovnici (38)

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_2'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'}, \quad (38)$$

ε_s je relativní permittivita složené soustavy, ε_1' je relativní permittivita první složky s objemovým dílem v_1 , ε_2' je relativní permittivita druhé složky.

Z aproximace $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_s$ vychází Böttcherův směsný vztah pro soustavu s kulovými částicemi (39)

$$\frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_s'} = 3v_1 \frac{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'}, \quad (39)$$

V praxi se nejčastěji využívá Lichteneckerova [2] mocninného vztahu (40), který lze pro dvousložkovou soustavu upravit na vztah (41).

$$\varepsilon_s'^k = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i'^k \quad (40)$$

$$\varepsilon_s'^k = v_1 \varepsilon_1'^k + v_2 \varepsilon_2'^k \quad (41)$$

Pro hodnotu $k = 0$ pak tento vztah přepisujeme do Lichteneckerova logaritmického vztahu (42)

$$\log \varepsilon'_s = v_1 \log \varepsilon'_1 + v_2 \log \varepsilon'_2, \quad (42)$$

který dobře popisuje složené soustavy statistického i matričního typu s libovolnou hodnotou poměrného objemového dílu všech složek soustavy s částicemi libovolného či neurčitého tvaru při chaotickém uspořádání složek a je tvarově jednoduchý. Čím menší bude poměr permitivit obou složek, tím přesnější bude popis dvousložkové složené soustavy daný vztahem (42). Při odvozování svých vztahů uvažoval Lichtenecker dvě složky o nejvyšším poměru $\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} = 4$. Vztah obsahuje empirický parametr k , který je závislý na tvaru a orientaci částic složené soustavy. Parametr k může obecně nabývat jakékoliv hodnoty v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$. Pro krajní hodnoty k odpovídá rovnice (41) vztahům (43) a (44)

$$\varepsilon'_s = v_1 \varepsilon'_1 + v_2 \varepsilon'_2, \quad (43)$$

$$\frac{1}{\varepsilon'_s} = v_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + v_2 \frac{1}{\varepsilon'_2}, \quad (44)$$

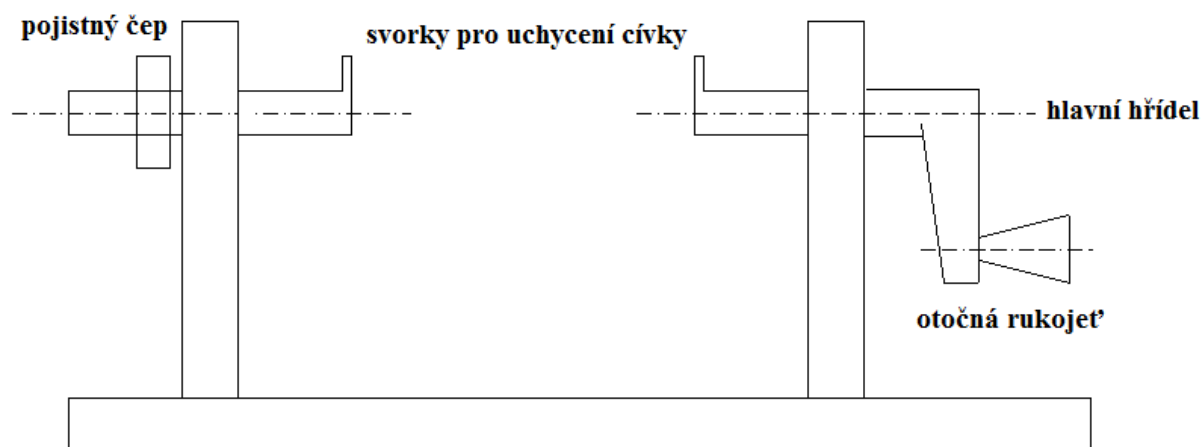
které popisují permitivitu soustavy složené ze dvou paralelně nebo sériově řazených vrstev.

1.6 Diagnostické testy vlastností elektroizolačních laků

V současné době se používají tři druhy diagnostických testů k určení vlastností elektroizolačních laků. Norma ČSN EN 61033 (346492) se zabývá třemi metodami zkoušek pro stanovení pevnosti spojení impregnačních hmot, jak na bázi rozpouštědlových laků, tak bezrozpouštědlových pryskyřic k podložce typu lakovaný vodič: ohybovou zkouškou na zkroucených cívkách (**twisted coil test**) a na šroubovitých cívkách (**helical coil test**), a tahovou zkouškou na svazcích vodičů (**wire bundle test**). Na pevnost spojení mají vliv podmínky vytvrzení, zkušební teplota, stupeň tepelného zestárnutí a u některých impregnačních hmot typ lakové izolace vodiče. V normě je detailně popsána příprava zkušebních vzorků včetně potřebných přípravků.

1.6.1 Twisted coil test

Jedná se o jednu ze tří metod, která se používá pro stanovení pevnosti spojení impregnačních hmot. Tento test se vyznačuje ohybovou zkouškou na zkroucených cívkách. V tomto testu se pomocí točivého stroje navine cívka ze smaltovaného drátu. Před vyjmutím cívky z točivého stroje zatočte nejméně třikrát oba konce cívky v opačném směru vinutí. Zabráníte tím uvolnění vinutí. Pro vinutí cívky platí tyto rozměry: průměr vinutí ($57 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), šířka otvoru ($6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), počet závitů (100), průměr drátu ($0,315 \text{ mm}$). Cívka se krotí podél své vodorovné osy do oválného tvaru na speciálním stroji (viz obr. 6).



Obr. 6 Stroj pro výrobu zkroucených cívek

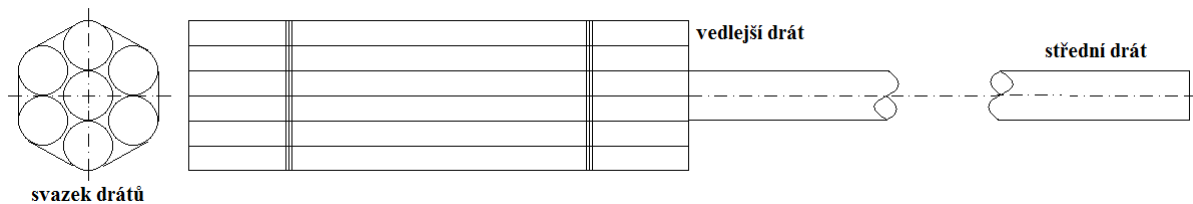
Zkroucená cívka má průměr 7 mm, délku 85 mm a nyní je připravena jako substrát pro impregnaci lakem. Cívku ponořte ve svislé poloze do impregnačního laku po dobu 5 minut \pm 1 minuta. Následně cívku vyjměte konstantní rychlostí 1 mm s^{-1} . Podle doporučení výrobce nechte cívku osušit po dobu 15 minut. Pro testování se používá teplotní komora. Před zahájením testování by zkušební vzorek měl být v teplotní komoře po určitou dobu, aby se vyrovnaly teploty. Pevnost vazby je vyjádřena střední hodnotou z pěti měření v newtonech.

1.6.2 Helical coil test

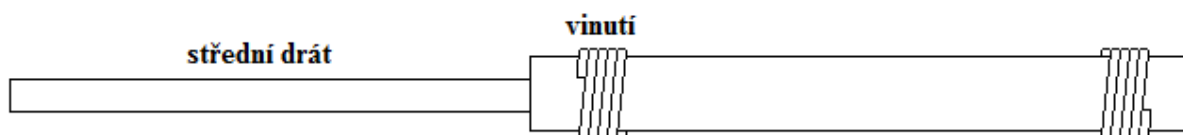
Jedná se o jednu ze tří metod, která se používá pro stanovení pevnosti spojení impregnačních hmot. Tento test se vyznačuje ohybovou zkouškou na šroubovitých cívkách. Síla potřebná k prolomení tohoto vinutí je mírou pevnosti vazby. Nejprve se připraví šroubovitě cívky ze smaltovaného drátu. Pro vinutí cívky platí tyto rozměry: průměr drátu 1 mm, průměr trnu 6,3 mm \pm 0,1 mm, délka cívky 75 mm \pm 2 mm, síla působící na vinutí 10 N \pm 1 N. Cívku ponořte ve svislé poloze do impregnačního laku po dobu 60 vteřin \pm 10 vteřin. Následně cívku vyjměte konstantní rychlostí 1 mm s^{-1} . Podle doporučení výrobce nechte cívku sušit po dobu 15 minut. Před zahájením testování by zkušební vzorek měl být v teplotní komoře po určitou dobu, aby se vyrovnaly teploty. Pevnost vazby je vyjádřena střední hodnotou z pěti měření v newtonech.

1.6.3 Wire bundle test

Jedná se o jednu ze tří metod, která se používá pro stanovení pevnosti spojení impregnačních hmot. Tento test se vyznačuje tahovou zkouškou na svazcích vodičů v cívkách. Síla potřebná k vytažení středního drátu od vinutí je mírou pevnosti vazby. Připravte svazek vodičů ze smaltovaného drátu podle obr. 7 nebo podle obr. 8.



Obr. 7 Příprava svazku vodičů ze smaltovaného drátu – metoda A



Obr. 8 Příprava svazku vodičů ze smaltovaného drátu – metoda B

Metoda A

Uspořádejte šest délek drátu o průměru $15 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ do svazku drátů kolem středního drátu, který má délku 120 mm (viz obr. 7). Ujistěte se, že konce vinutí jsou v jedné rovině s koncem svazku.

Metoda B

Uspořádejte šest délek drátu o délce 105 mm do svazku drátů o délce 120 mm, aby se dráty o průměru $15 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ bezpečně překrývaly v bezpečné vzdálenosti s měděným vinutím o průměru 0,35 mm. (viz obr. 8). Vložte drát o délce 50 mm do středního otvoru na konci svazku. Konec svazku se šesti dráty musí být uchycen do čelisti stroje pro testování tahem spolu s konci měděných drátů.

Cívku ponořte ve svislé poloze do impregnačního laku po dobu 5 minut. Následně cívku vyjměte konstantní rychlostí 1 mm s^{-1} . Podle doporučení výrobce nechte cívku osušit po dobu 15 minut. Během těchto operací musí být zkušební vzorek ve svislé poloze. Některé impregnační laky s vysokou viskozitou nebo tixotropní produkty mohou vyžadovat alternativní metody zpracování. Vzorek musí být čelistech stroje umístěn tak, aby maximální síly bylo dosaženo přibližně za 1 minutu. Před zahájením testování by zkušební vzorek měl být v teplotní komoře po určitou dobu, aby se vyrovnaly teploty. Pevnost vazby je vyjádřena střední hodnotou z pěti měření v newtonech. [7]

2 Praktická část

2.1 Rozbor použité polyesterové pryskyřice

2.1.1 Polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102

Při vytváření zkušebních vzorků byla použita polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102 třídy H. Jedná se o jednosložkovou polyesterovou pryskyřici, která je vhodná pro impregnaci statorů, rotorů, trakčních vinutí, transformátorů a cívek. Dolphon XL 2102 neobsahuje formaldehyd, styren, vinyltoluen, ani tri-methyl-benzen. Má velice nízký váhový úbytek během použití a vynikající smáčecí vlastnosti. Charakteristický je také svojí dobrou lepivostí a relativně rychlým vytvrzovacím cyklem.

2.1.2 Doba vypalování

Polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102 se vypaluje:

- 2,5 hodiny při teplotě 150 °C
- 2 hodiny při teplotě 160 °C
- 1,25 hodiny při teplotě 170 °C.

Čas musí být měřen od momentu, kdy jednotka dosáhne vypalovací teplotu.

Tab. 1 Vlastnosti polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102

Hustota při 25 °C	1050 ± 50 kg m ⁻³	
Doba želatinace	s 1 % reakčního činidla 198D s 2 % reakčního činidla 198D	při 100 °C 8 – 12 min při 100 °C 6 – 9 min
Viskozita při 23 °C	120 – 180 s	
Váhový úbytek	15 g pryskyřice, od 100 °C do 140 °C, za 20 min	< 1,3 %
Dielektrická pevnost	ASTM D-115, 23 °C	> 128 kV mm ⁻¹

2.2 Rozbor použité slídy

V experimentu byla použita mikromletá slída Mica-M. Jedná se o nerostnou surovinu vyrobenou mletím nebo slídových odpadů. Velikost částic je zde menší než 15 μm. Tento typ slídy neobsahuje vodivé částice. [5]

2.3 Rozbor použitých forem pro vytvrzení

Polyesterová pryskyřice byla nanášena do forem z teflonu (polyetylénteraftalátu). Teflon má dlouhodobou tepelnou stabilitu a jde tedy o termoplast. Na tyto formy, předem očištěné technickým lihem, byla nanesena čistá pryskyřice a pryskyřice s příměsí slídy o různé koncentraci a následně byly vzorky vytvrzovány v přehřáté peci. Dále byla polyesterová pryskyřice nanesena do forem z lukoprenu. Oba typy forem se ukázaly jako nevyhovující pro vytvrzování vzorků polyesterové pryskyřice.

V dalších pokusech byly zvoleny k nanášení a vytvrzování polyesterové pryskyřice hliníkové podložky o průměru $d = 70$ mm a průměrné tloušťce $h = 1,487$ mm. Takto vytvořené vzorky se ukázaly jako vhodnější pro další použití.

Po úspěšném vytvrzení polyesterové pryskyřice na hliníkových podložkách bylo rozhodnuto vyrobit pro další pokusy formy z hliníku. Forma má vnější průměr $d_1 = 80$ mm, její tloušťka je $h_1 = 5$ mm. Vnitřní průměr je $d_2 = 70$ mm a tloušťka je $h_2 = 1$ mm. V takto vyrobené formě se podařilo vytvrdit nejpřesnější lakové vzorky, které jsou použitelné k dalším částem experimentů.

2.4 Příprava vzorků do teflonových forem

Teflonové formy byly vyčištěny a odmaštěny technickým lihem. Poté byly formy umístěny do pece a nahřány na teplotu 80 °C po dobu 30 minut. Pak byly formy z pece přemístěny na pracovní stůl a injekční stříkačkou do nich byl nanesen předem vypočítaný objem polyesterové pryskyřice. První forma byla naplněna čistou pryskyřicí bez příměsí, ostatní formy pryskyřicí s 2 %, 5 %, 10 % mikromleté slídy. Pryskyřice je třeba důkladně promíchat skleněnou tyčinkou, čímž se sníží viskozita a pryskyřice se lépe rozlévá do formy. Po naplnění forem se na povrchu vzorku objevují bublinky, které musí být odstraněny preparační jehlou. Takto ošetřené vzorky byly vloženy do horkovzdušného sterilizátoru STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu, kde byly vytvrzovány při teplotě 160 °C po dobu 120 minut.

Vytvrzené vzorky čisté pryskyřice obsahovaly několik bublin. Tyto vzduchové mezery, vzniklé mezi vytvrzeným vzorkem a elektrodovým systémem, představují sériově připojenou kapacitu vzduchového kondenzátoru ke kondenzátoru tvořeného vytvrzeným vzorkem. Následkem je menší kapacita a tedy snížení hodnot relativní permitivity. Vytvrzené vzorky s příměsemi slídy se prohnuly, mírně smrštily a některé i praskly. Po opakovaných pokusech stále docházelo k pronutí a praskání vzorků.

2.5 Příprava vzorků na hliníkové podložky

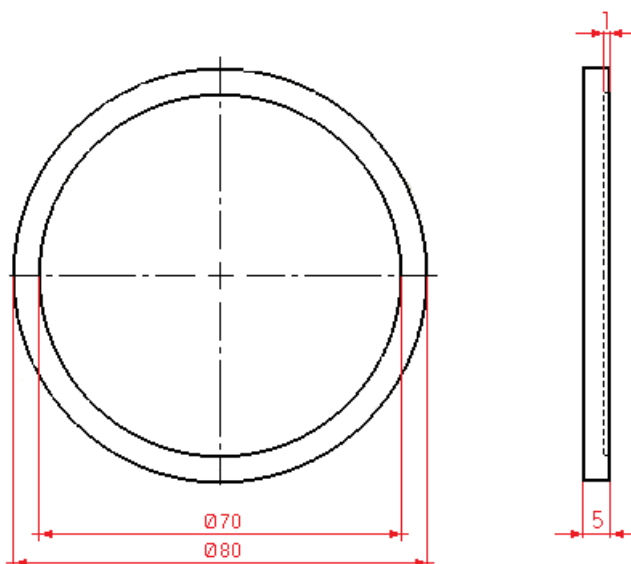
Hliníkové podložky byly nejprve očištěny a odmaštěny technickým lihem, aby se jejich povrch zbavil veškerých nečistot, které by mohly ovlivnit vytvrzení vzorku. Předem byl vypočítán objem budoucího vzorku, hmotnost polyesterové pryskyřice a slídy pro tři vzorky s pryskyřicí bez příměsí, pro tři vzorky se 4 % mikromleté slídy, tři vzorky se 6 % mikromleté slídy a tři vzorky s 8 % mikromleté slídy. Pryskyřice se slídou byla důkladně promíchána v plastových kelímcích skleněnou tyčinkou, čímž se snížila viskozita a tak se pryskyřice lépe nanášela na podložky. Pryskyřice se slídou v kelímcích začala „pracovat“ (docházelo k uvolňování bublin), proto byly takto připravené vzorky ponechány v kelímcích „ustavit“ po dobu 75 minut. Po této době se v pryskyřici přestaly tvořit bubliny a pryskyřice se slídou se úplně spojily a bylo možno přistoupit k nanesení pryskyřice na podložky. Očištěné podložky byly nejprve umístěny do pece a nahřány na teplotu 80 °C po dobu 30 minut. Pak byly přemístěny na pracovní stůl a injekční stříkačkou nanesen předem vypočítaný objem polyesterové pryskyřice. Nebylo třeba použít preparační jehlu, protože se nevytvořily žádné bubliny. Takto ošetřené vzorky byly vloženy do horkovzdušného sterilizátoru STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu, kde byly vytvrzovány při teplotě 160 °C po dobu 120 minut. Vzorky po vytvrzení vypadaly dobře a neobsahovaly žádné bubliny a praskliny (viz obr. 9).



Obr. 9 Vytvrzené vzorky na hliníkových podložkách

2.6 Příprava vzorků do hliníkových forem

- 1) Nejprve byly za pomoci jemného smirkového papíru obroušeny nerovnosti vnitřních částí hliníkových forem (viz obr. 10) a poté byl jejich povrch vyleštěn brusnou pastou. Tímto bylo dosaženo hladkého povrchu ve všech formách. Povrch těchto forem byl následně vyčištěn technickým lihem, čímž se povrch zbavil veškeré mastnoty a nečistot, které by mohly ovlivnit kvalitu vytvrzeného vzorku.



Obr. 10 Hliníková forma pro přípravu vzorku

- 2) Před každým vytvrzováním je velice důležité vyvážit vodováhou vnitřní rošt horkovzdušného sterilizátoru STERICELL 55, na který se budou formy pokládat! I sebemenší nerovnost může mít za následek rozlití pryskyřice Dolphon XL 2102 přes okraj formy, a tím špatné vytvrzení vzorku. V tomto případě může dojít i k prasknutí vzorku. Po vyvážení vnitřního roštu byly očištěné formy vloženy do horkovzdušného sterilizátoru STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu (viz obr. 11) a nahřány na teplotu 80 °C po dobu 30 minut (viz obr. 12).

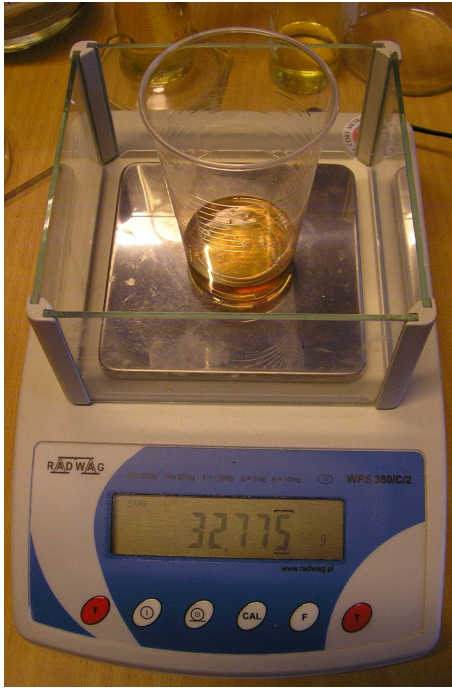


Obr. 11 Horkovzdušný sterilizátor STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu

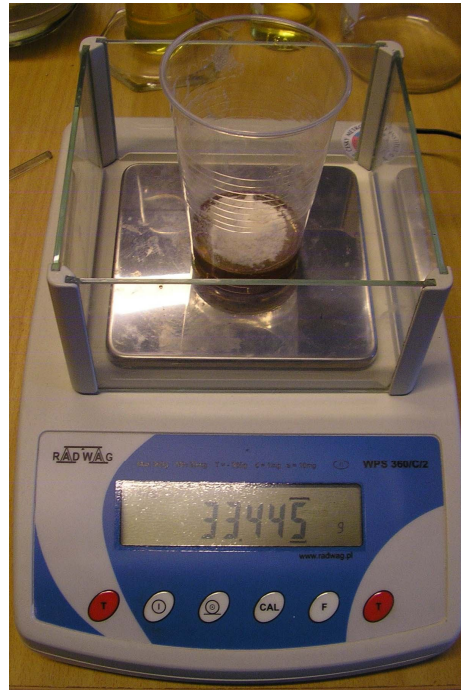


Obr. 12 Hliníkové formy předehřáté na teplotu 80 °C

- 3) Na digitální váhu byl položen plastový kelímek. Potom byla digitální váha vynulována a následně pomocí injekční stříkačky vložen do plastového kelímku objem pryskyřice potřebný pro výrobu vzorků (pryskyřice bylo vždy vloženo o několik ml více, aby se vytvořila rezerva (viz obr. 13)). Hmotnost pryskyřice byla zapsána a následně bylo vypočteno množství mikromleté slídy Mica-M nutné pro získání 2% roztoku (viz obr. 14).



Obr. 13 Navážení polyesterové pryskyřice



Obr. 14 Přidání slídy Mica-M

- 4) Polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102 byla se slídou Mica-M důkladně promíchána pomocí ultrazvukové míchačky po dobu 10 minut, čímž se snížila viskozita a pryskyřice se tak lépe rozlévala do předem přehřátých forem (viz obr. 15).



Obr. 15 Míchání roztoku pomocí ultrazvukové míchačky

- 5) Po rozmíchání pryskyřice Dolphon XL 2102 a mikromleté slídy Mica-M byl ponechán roztok po dobu 20 minut v klidu pro ustálení. Během této doby vyprchaly drobné vzduchové bubliny (viz obr. 16).

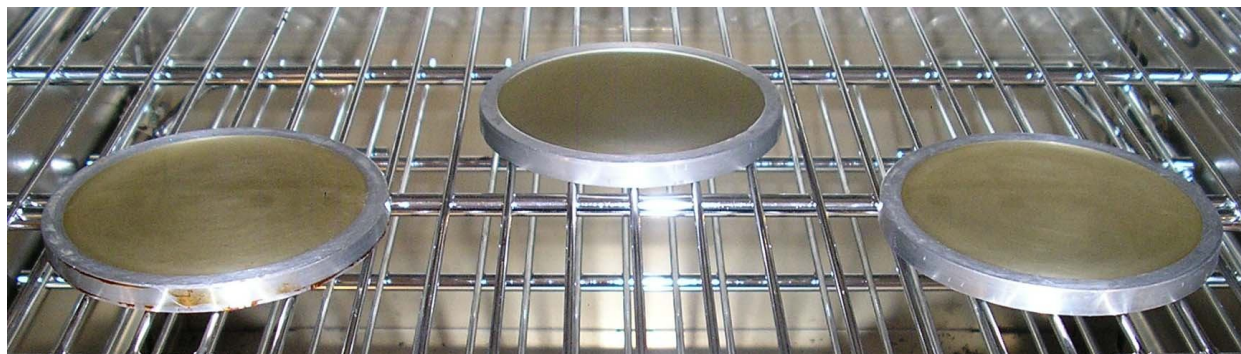


Obr. 16 Ustálený roztok

- 6) Po uplynutí 30 minut byly předehřáté formy přemístěny z horkovzdušného sterilizátoru STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu na pracovní stůl a injekční stříkačkou byl do forem vložen ustálený a předem vypočítaný objem roztoku polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102 a mikromleté slídy Mica-M. Při nanášení roztoku je také velice důležité mít pracovní plochu v rovině. Krouživými pohyby směrem od středu k okraji formy lze rovnoměrně vyplnit celou formu směsí. V pryskyřici se v tomto případě nevytvořily prakticky žádné vzduchové bubliny (viz obr. 17). Takto ošetřené vzorky byly vloženy do horkovzdušného sterilizátoru STERICELL 55 s nucenou cirkulací vzduchu (viz obr. 18). Tyto vzorky byly v souladu s doporučením výrobce vytvrzovány při teplotě 160 °C po dobu 120 minut (viz obr. 19). Takto vytvrzené vzorky neobsahovaly žádné vzduchové bubliny a praskliny a byly tedy vhodné k samotnému měření vlastností (viz obr. 20).



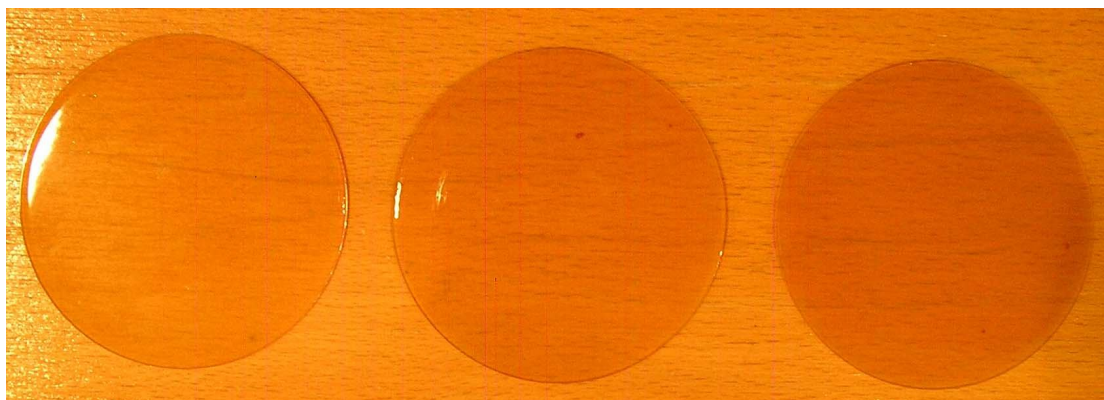
Obr. 17 Roztok polyesterové pryskyřice a mikromleté slídy Mica-M před vytvrzením



Obr. 18 Umístění forem v horkovzdušném sterilizátoru STERICELL 55



Obr. 19 Vytvrzené vzorky v horkovzdušném sterilizátoru STERICELL 55



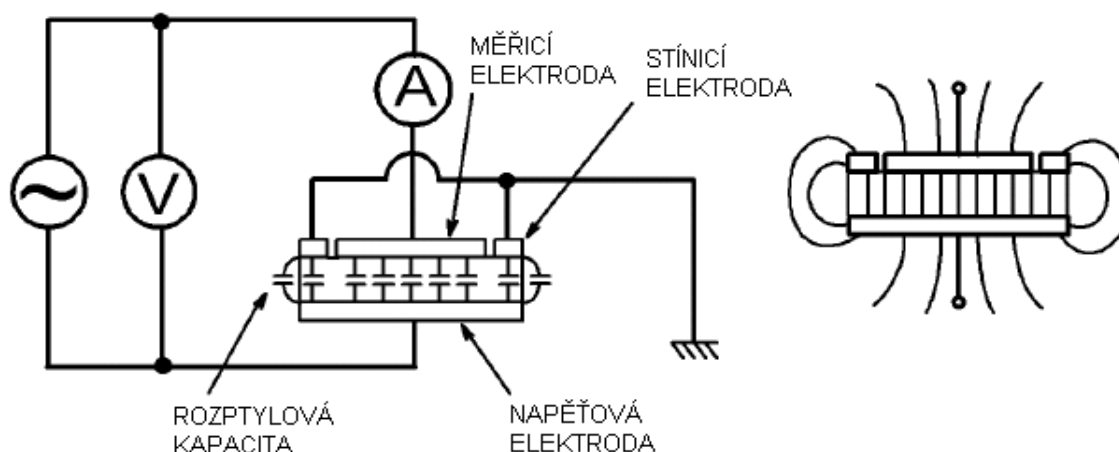
Obr. 20 Vytvrzené vzorky

- 7) Podle bodů 1) až 6) byly vyrobeny vzorky polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102 s 2, 4, 6 a 8 hmotnostními procenty mikromleté slídy Mica-M. Čisté vzorky polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102 byly vyrobeny podle bodů 1), 2), 3) a 6), samozřejmě jen za použití čisté polyesterové pryskyřice Dolphon XL 2102.

2.7 Použité měřicí metody a přístroje

2.7.1 Střídavá metoda

Při měření byl použit tříelektrodový systém HP 16451B (viz obr. 21). Vytvrzený vzorek se vsune mezi měřicí a napět'ovou elektrodu a následně se v systému upne (viz obr. 22). Tento elektrodový systém je dále připojen na RLC metr Agilent E4980A (viz obr. 23). RLC metrem se měří kapacita a ztrátový činitel vzorku při kmitočtech od 100 Hz do 1 MHz, protože nižší kmitočty jsou zatíženy velkou chybou. Proud protékající rezistorem R je vyvažován operačním zesilovačem a to tak, že pokud není v bodě L 0 V, je protékající proud analyzován a zpětnou vazbou korigován tak, aby si byly proudy v bodě L rovny a tím most opět vyvážen. Impedance je vypočtena z naměřených proudů, napětí a fázových posuvů na vzorku a rezistoru R. Pomocí oscilátoru může být měněn kmitočet v rozsahu 20 Hz až 2 MHz. Měřicí zařízení se vyznačuje šesti místným rozlišením pro každý měřicí rozsah a jeho základní přesnost je 0,05 %. Naměřená data byla zpracována v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. V programu Microsoft Excel byly vytvořeny grafy závislosti ztrátového čísla a relativní permitivity na kmitočet, vypočítané z naměřených hodnot kapacit a ztrátového činitele. [13]



Obr. 21 Zapojení tříelektrodového systému HP 16451B [11]



Obr. 22 Třielektrodový systém HP 16451B



Obr. 23 RLC metr Agilent E4980A [12]

2.7.2 Stejnsměrná metoda

Pro měření vlastností materiálu v časové oblasti byl použit elektrometr Keithley 6517A (viz obr. 24), který slouží pro měření vysokých odporů izolačních materiálů. Testovací napětí může být voleno z rozsahu 0,1 - 1000 V stejnosměrných. Měřenými parametry jsou v našem případě vnitřní odpor a proud. Rozsah měřeného odporu je $10^3 - 1,6 \cdot 10^{16} \Omega$. Základní přesnost je 0,6 %. Pomocí dodávaného softwaru jsou pak výsledky zpracovávány v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Elektrometr spojíme s tříelektrodovým systémem Keithley 8009 (viz obr. 25). Tento systém je opatřen krytem zamezujícím možnosti přijít do styku s nebezpečným vysokým napětím. [14]



Obr. 24 Elektrometr Keithley 6517A



Obr. 25 Tříelektrodový systém Keithley 8009

2.8 Výpočet složek komplexní permitivity

Při měření se hodnoty kapacity a ztrátového činitele zaznamenávají pomocí specifického softwaru do programu MS Excel. Z těchto hodnot se počítají složky komplexní permitivity.

Geometrická kapacita se vypočítá podle vzorce (45)

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{\pi (d_m + c)^2}{4h}, \quad (45)$$

kde d_m je průměr měřicí elektrody (38 mm), c je vzdálenost mezi měřicí a stínicí elektrodou (0,2 mm), h je tloušťka vzorku.

Podílem změřené kapacity C_x a geometrické kapacity C_0 se získá relativní permitivitu ε' - podle vztahu (46)

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (46)$$

Ztrátové číslo se vypočítá podle vztahu (47)

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta. \quad (47)$$

Příklad výpočtu pro vzorek č.1 bez příměsi slídy:

$$C_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\pi (0,038 + 0,0002)^2}{4 \cdot 0,001031} = 9,842 \text{ F} \quad (48)$$

$$\varepsilon' = \frac{3,338}{9,842} = 3,392 \quad (49)$$

$$\varepsilon'' = 3,392 \cdot 0,019 = 0,064 \quad (50)$$

2.8.1 Měření tloušťky vrstvy polyesterové pryskyřice

Pro měření byly použity vzorky polyesterové pryskyřice vytvrzené v hliníkových formách. U každého vzorku byla proměřena tloušťka na jedenácti různých místech. Pro další výpočet byl používán aritmetický průměr z opakovaných měření. K měření tloušťky byl použit digitální mikrometr (viz obr. 26).

Tab. 2 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice bez příměsí slídy

Číslo vzorku	1	2	3
h (mm)	1,031	1,025	1,018

Tab. 3 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 2 % příměsí slídy

Číslo vzorku	1	2	3
h (mm)	1,000	0,998	0,996

Tab. 4 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 4 % příměsí slídy

Číslo vzorku	1	2	3
h (mm)	0,994	0,993	0,992

Tab. 5 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 6 % příměsí slídy

Číslo vzorku	1	2	3
h (mm)	0,985	0,989	0,982

Tab. 6 Tloušťky vytvrzené polyesterové pryskyřice s 8 % příměsí slídy

Číslo vzorku	1	2	3
h (mm)	0,998	0,997	1,000



Obr. 26 Digitální mikrometr

2.8.2 Měření hmotnosti lakových vzorků

Pro měření byly použity vzorky polyesterové pryskyřice vytvrzené v hliníkových formách. Pro zjištění hmotnosti lakových vzorků byla použita elektronická laboratorní váha RADWAG AS 220/C/2 s rozlišovací schopností 0,1 mg (viz obr. 27).

Tab. 7 Tabulka hmotností jednotlivých vzorků

vzorek č.	plnění (%)	hmotnost (g)
1	0	4,819
2		4,629
3		4,639
1	2	4,715
2		4,736
3		5,017
1	4	4,27
2		4,396
3		4,189
1	6	4,588
2		4,373
3		4,155
1	8	5,005
2		5,153
3		5,067



Obr. 27 Digitální váha RADWAG AS 220/C/2 [15]

2.9 Výsledky a grafické zpracování naměřených hodnot

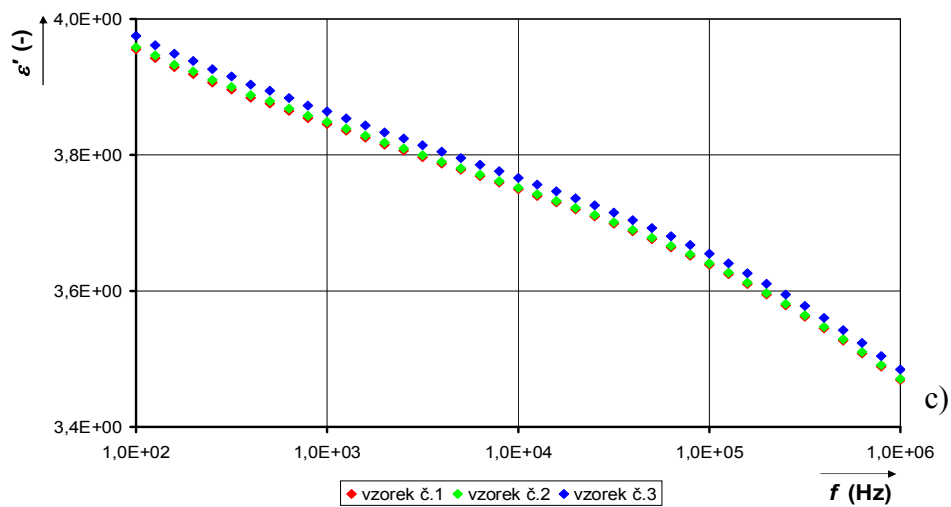
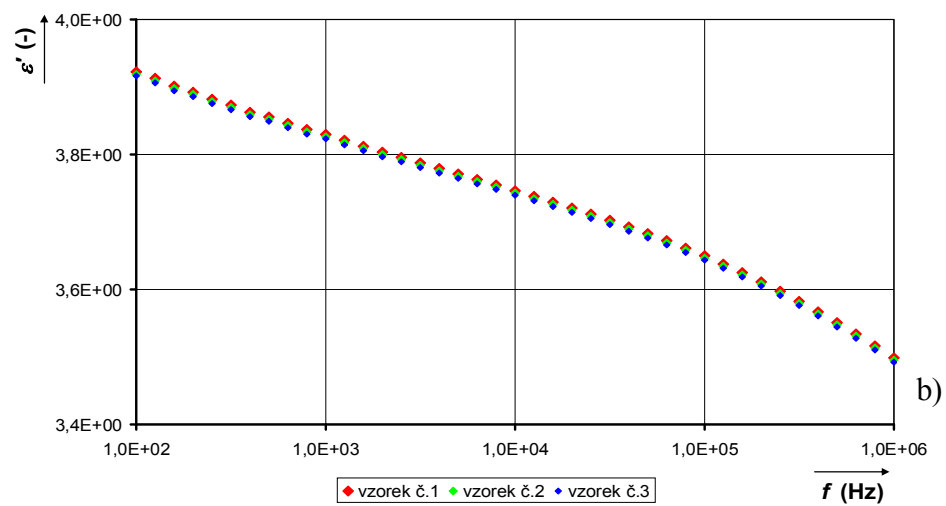
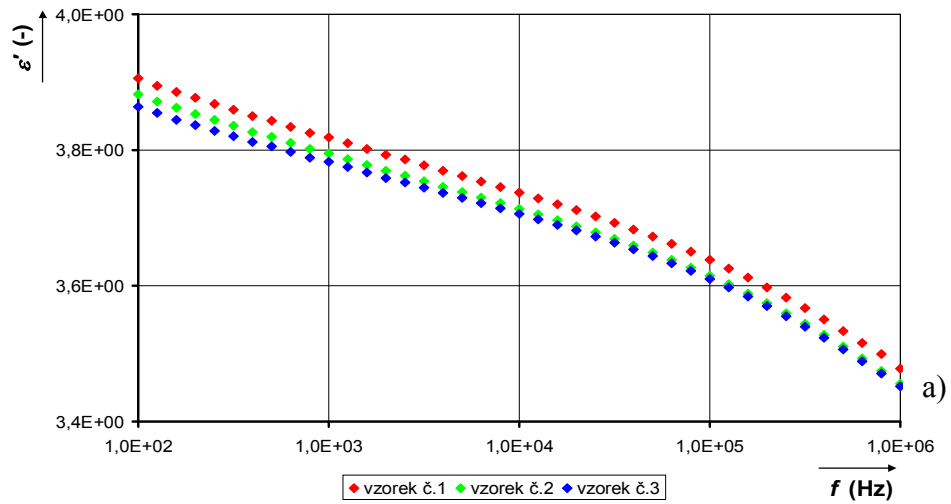
2.9.1 Střídavá metoda

Měření kmitočtových závislostí relativní permitivity a ztrátového činitele bylo provedeno na 15 vzorcích (5 sad po 3 vzorcích). Výsledky experimentu jsou vyjádřeny následujícími obrázky, které ukazují vliv mikromleté slídy Mica-M na kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla, tedy složky komplexní permitivity lakových vzorků s různým podílem mikromleté slídy. Se zvyšující se koncentrací mikromleté slídy se zvyšuje relativní permitivita i ztrátové číslo vzorků. Měření byla provedena pro vzorky polyesterové pryskyřice s různými podíly slídy.

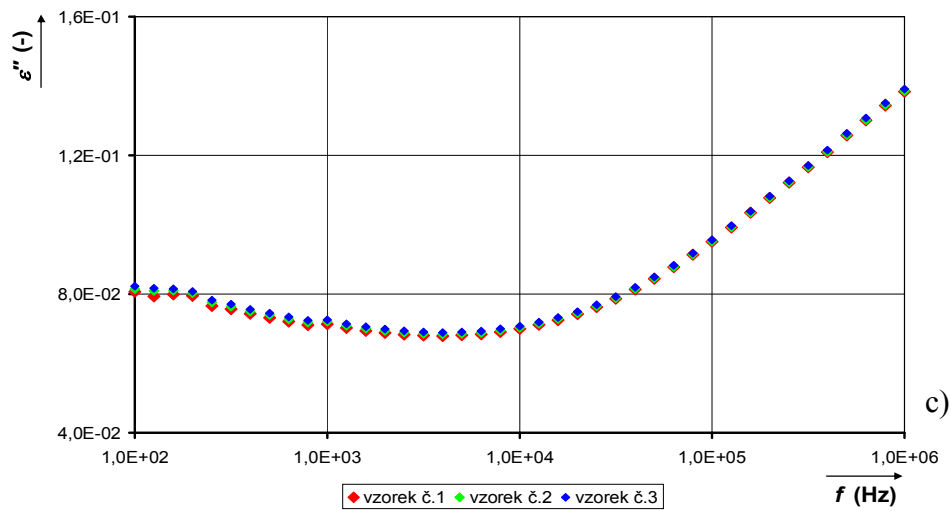
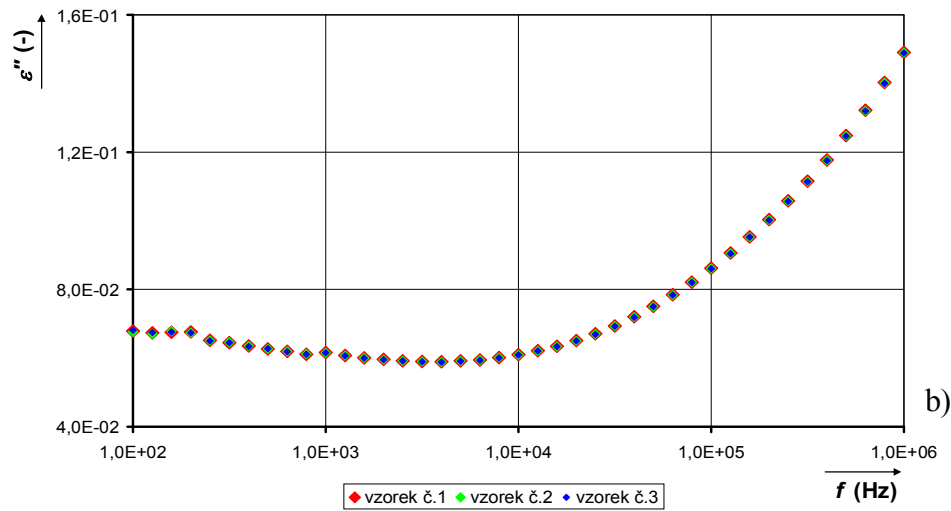
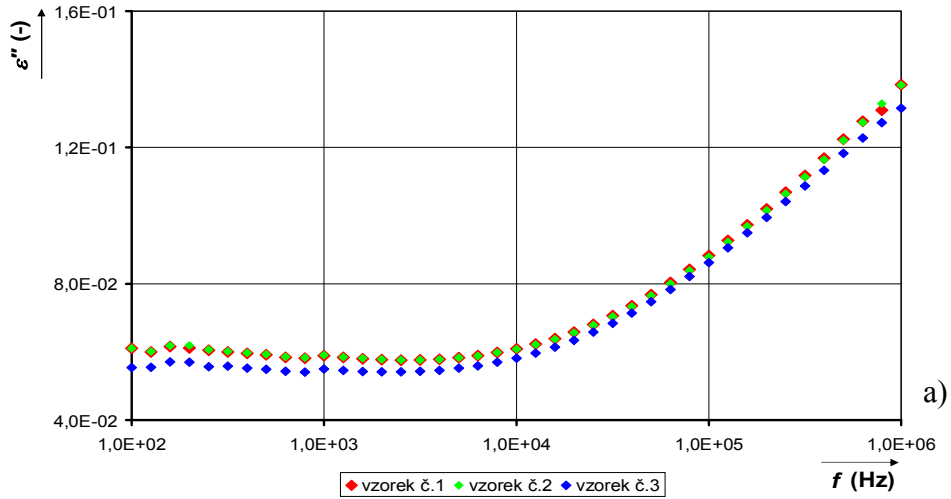
Z obr. 31 je patrné, že se zvyšujícím se plněním mikromleté slídy Mica-M roste i hodnota relativní permitivity vzorků. V tomto obrázku jsou zobrazeny průměrné hodnoty všech měřených vzorků. Relativní permitivita čisté slídy Mica-M byla naměřena 5,051. Průměrná hodnota relativní permitivity čisté polyesterové pryskyřice je 3,799 pro kmitočet 1 kHz, se 4 % příměsí slídy je 3,826 pro kmitočet 1 kHz a s 8 % příměsí slídy je 3,853 pro kmitočet 1 kHz. Tyto hodnoty s rostoucím kmitočtem klesají. V obr. 28 je detailněji zobrazena kmitočtová závislost relativní permitivity pro jednotlivé vzorky bez příměsí slídy (a), se 4 % příměsí slídy (b) a s 8 % příměsí slídy (c). Protože se jedná o malé koncentrace příměsí slídy, rozdíly hodnot relativní permitivity se pohybují v řádech desetin.

V obr. 29 je detailněji zobrazena kmitočtová závislost ztrátového čísla pro jednotlivé vzorky bez příměsí slídy (a), se 4 % příměsí slídy (b) a s 8 % příměsí slídy (c). U vzorků obsahující slídu Mica-M jsou hodnoty ztrátového čísla vyšší než u čisté polyesterové pryskyřice. Ztrátové číslo je v okolí kmitočtu 100 Hz téměř zanedbatelné, avšak od kmitočtu 1 kHz se ztrátové číslo začne zvyšovat. Tento jev je patrný se zvyšujícím se procentem plnění (viz obr. 30). Měření dielektrických veličin bylo ovlivněno nedokonalé rovinným povrchem vzorků, což mělo za následek vznik malých, ale ne zanedbatelných vzduchových mezer mezi zkoumaným vzorkem a přiloženými elektrodami. Vzduchové mezery snižovaly výslednou kapacitu vzorků, proto je zapotřebí klást důraz zejména na výrobu vzorků s co nejrovnějším povrchem.

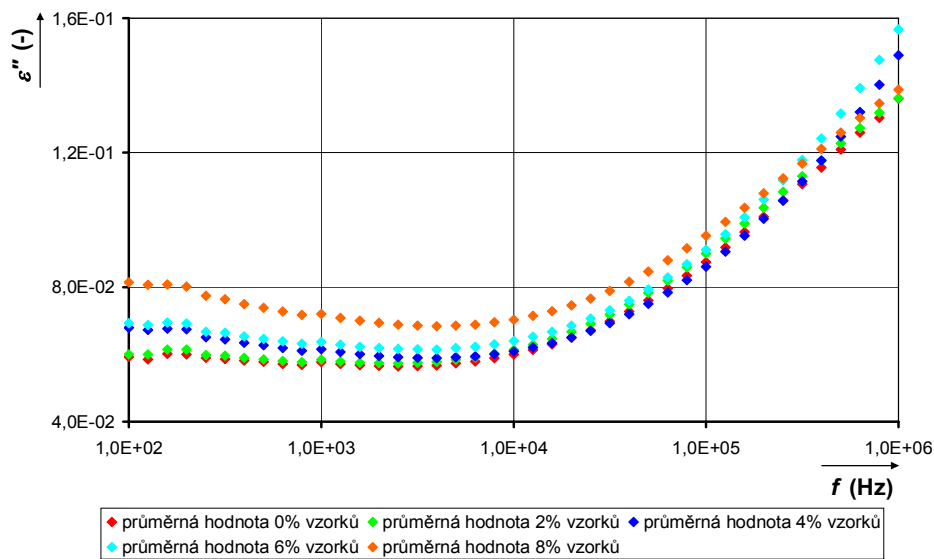
Obr. 32 zobrazuje závislost $\varepsilon' = f(\varepsilon'')$ pro vzorek se 4 % příměsí slídy a s 8 % příměsí slídy. Rozdíl závislosti $\varepsilon' = f(\varepsilon'')$ mezi všemi plněnými vzorky je velice malý, a proto jsou pro lepší vypočítací schopnost zobrazeny jen dva vzorky. Grafická vyjádření a matematické výpočty všech vzorků jsou uloženy na přiloženém CD.



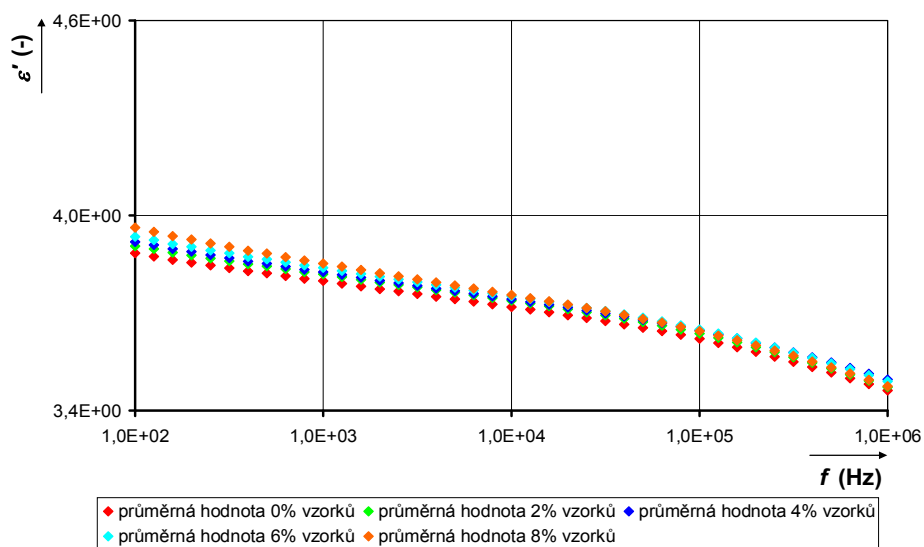
Obr. 28 Kmitočtová závislost relativní permitivity pro vzorky bez příměsi slídy (a), s 4 % příměsi slídy (b), s 8 % příměsi slídy (c)



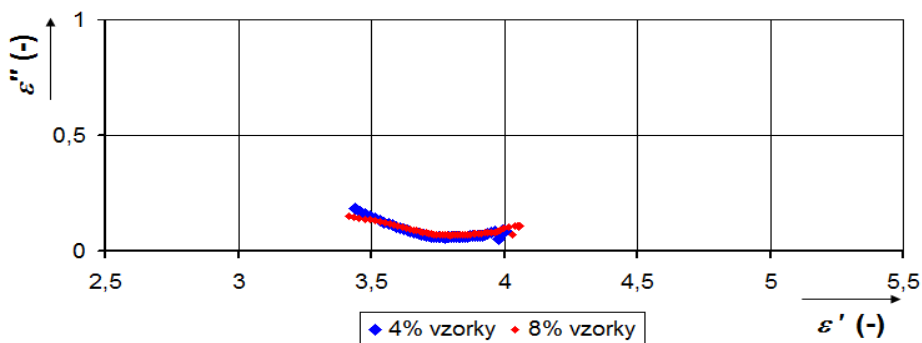
Obr. 29 Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro vzorky bez příměsi slídy (a), s 4 % příměsí slídy (b), s 8 % příměsí slídy (c)



Obr. 30 Kmitočtová závislost ztrátového čísla pro 0%, 2%, 4%, 6% a 8% vzorky



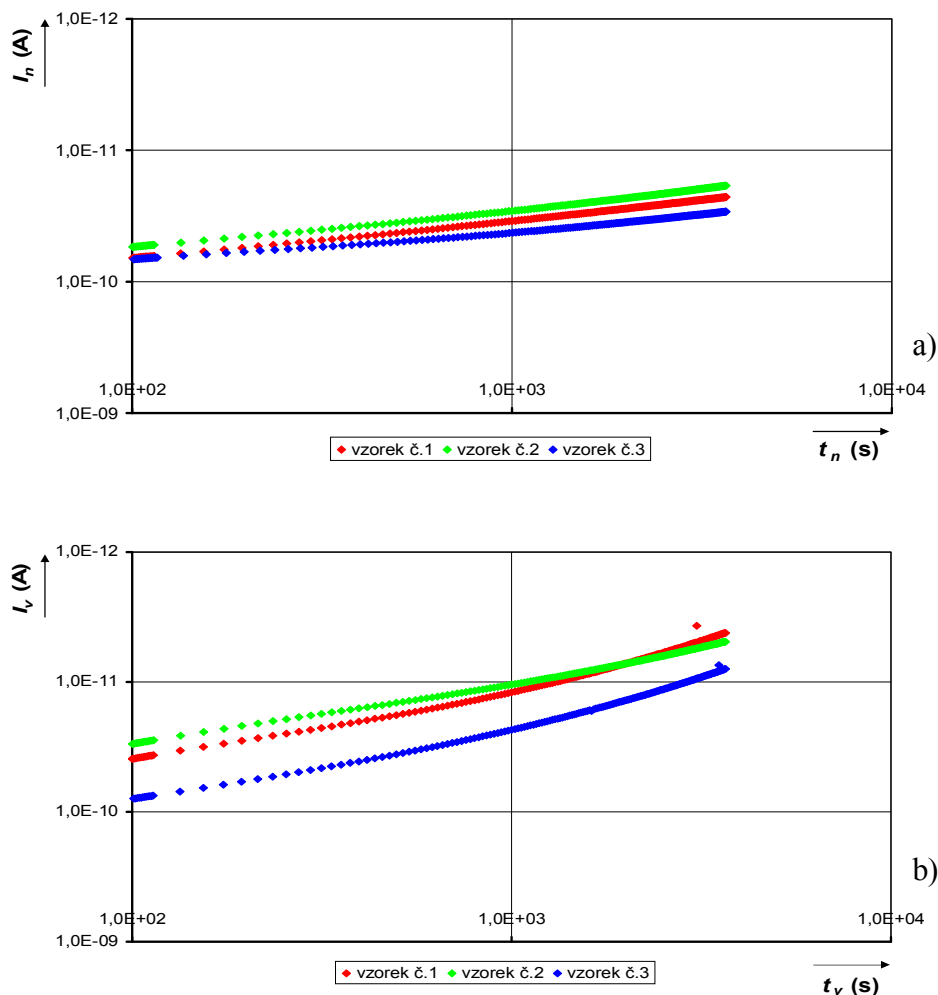
Obr. 31 Kmitočtová závislost relativní permitivity pro 0%, 2%, 4%, 6%, 8% vzorky



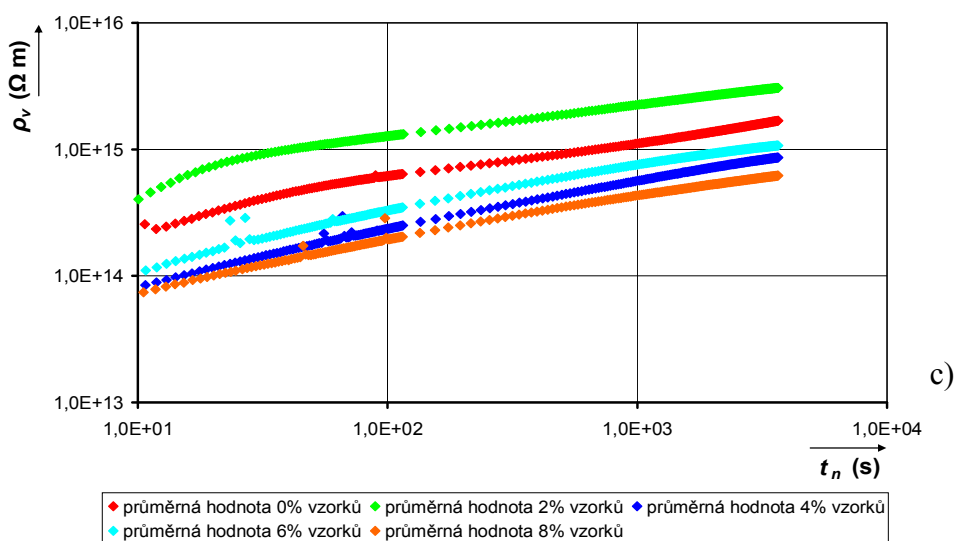
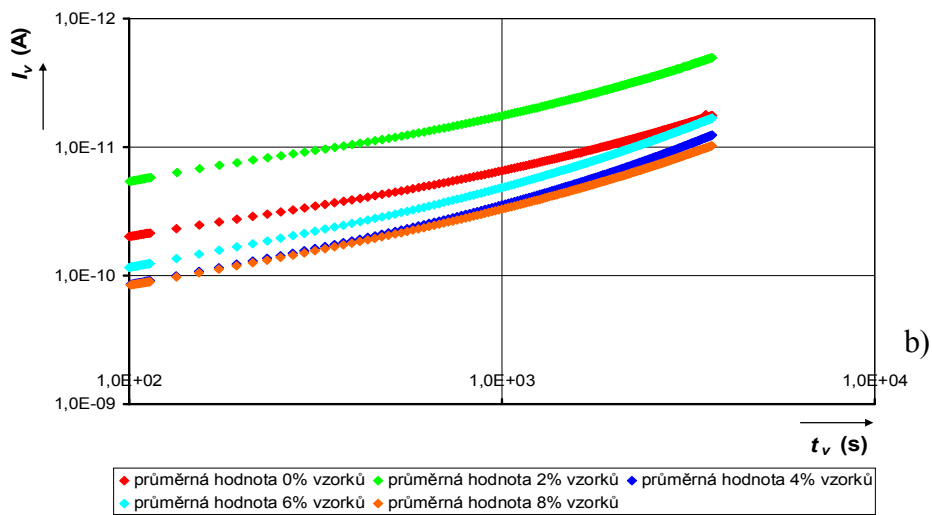
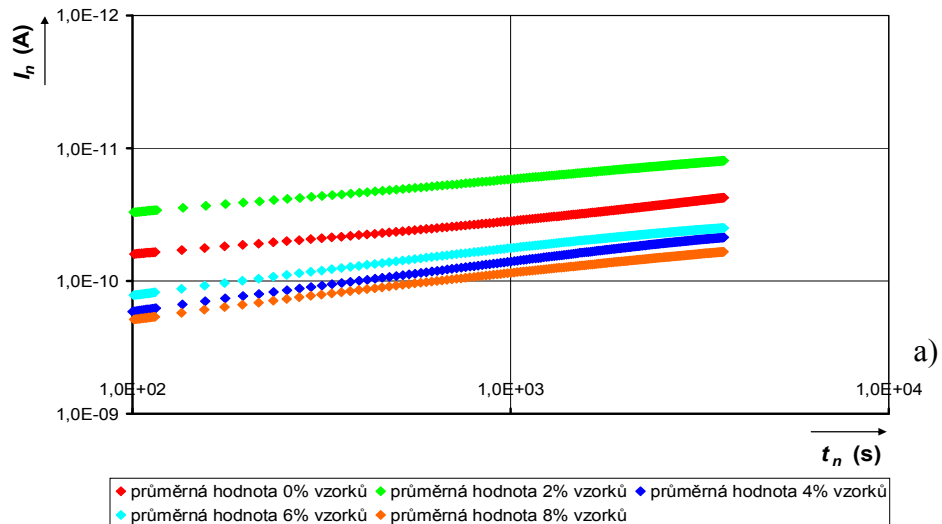
Obr. 32 Závislost $\varepsilon'' = f(\varepsilon')$

2.9.2 Stejnsměrná metoda

Měření časové závislosti nabíjecího a vybíjecího proudu bylo provedeno na 15 vzorcích (5 sad po 3 vzorcích). Každý vzorek byl při napětí 500 V nabíjen po dobu jedné hodiny a následně po dobu jedné hodiny vybíjen. Z naměřených hodnot byly pro všechny vzorky vyneseny časové závislosti nabíjecího a vybíjecího proudu. Obr. 33 zobrazuje časovou závislost nabíjecího proudu (a) a časovou závislost vybíjecího proudu (b) pro tři vzorky čisté polyesterové pryskyřice. Pro lepší grafické vyjádření jsou hodnoty vyneseny v logaritmických souřadnicích. Z hodnoty vnitřního odporu, tloušťky vzorku a rozměru elektrodového systému byla vypočítána podle vztahu (3) vnitřní rezistivita experimentálních vzorků. Obr. 34 zobrazuje časovou závislost nabíjecího proudu (a) a časovou závislost vybíjecího proudu (b) pro průměrné hodnoty všech měřených vzorků. Časová závislost vnitřní rezistivity pro průměrné hodnoty všech měřených vzorků jsou zobrazeny v obr. 34 (c). Grafická vyjádření a matematické výpočty všech vzorků jsou uloženy na příloženém CD.



Obr. 33 Časová závislost nabíjecího proudu (a), časová závislost vybíjecího proudu (b)



Obr. 34 Časová závislost nabíjecího proudu (a), časová závislost vybíjecího proudu (b), časová závislost vnitřní rezistivity (c)

2.10 Matematická interpretace směsných vztahů

Po změření vlastností všech vzorků při různém kmitočtu byly na naměřené výsledky aplikovány směsné vztahy, které jsou uvedeny v kapitole 1.5.2. Hodnota hustoty čisté slídy Mica-M 2,667 kg m⁻³ byla odečtena z katalogového listu. Hodnota hustoty čisté polyesterové pryskyřice Dolphon XL2102 1050 kg m⁻³ byla také odečtena z katalogového listu. Matematické interpretace směsných vztahů všech vzorků jsou uloženy na příloženém CD.

Pro ukázkou je zde uveden příklad výpočtu pro vzorek číslo 1 se 4 % příměsí mikromleté slídy.

$$V_{\text{vzorku}} = \pi r^2 h = (3,142 \cdot 33,9 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,994 \cdot 10^{-3} = 3,589 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (51)$$

$$m_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{vzorku}}}{100} \cdot 4 = \frac{4,270 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot 4 = 0,171 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad (52)$$

$$V_{\text{slidy}} = \frac{m_{\text{slidy}}}{\rho_{\text{slidy}}} = \frac{0,171 \cdot 10^{-3}}{2667} = 0,064 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (53)$$

$$v_1 = \frac{V_{\text{slidy}}}{V_{\text{vzorku}}} = \frac{0,064 \cdot 10^{-6}}{3,589 \cdot 10^{-6}} = 0,018 \quad (54)$$

$$v_2 = 1 - v_1 = 1 - 0,018 = 0,982 \quad (55)$$

Z každé sady vzorků byly vybrány 3 vzorky, pro které byla vypočtena hodnota relativní permitivity podle směsných vztahů. Hodnoty ε'_1 a ε'_2 jsou odečteny ze změřených průměrných hodnot relativních permitivit čisté slídy (ε'_1) a čistého laku ε'_2 pro daný kmitočet 1000 Hz. Vypočtené hodnoty byly srovnány s průměrnými hodnotami naměřených relativních permitivit lakových vzorků s odpovídajícím podílem mikromleté slídy (viz tab. 8,

tab. 9, tab. 10 a

tab. 11.). Pro ukázkou jsou zde uvedeny příklady výpočtů pomocí jednotlivých směsných vztahů pro vzorek číslo 1 se 4 % příměsí slídy mikromleté slídy.

Lichteneckerův mocninný vztah pro $k = 1$:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_s &= v_1 \varepsilon'_1 + v_2 \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_s &= 0,018 \cdot 5,051 + 0,982 \cdot 3,799 \\ \varepsilon'_s &= 3,821 \end{aligned} \quad (56)$$

Lichteneckerův mocninný vztah pro $k = -1$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon'_s} &= v_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + v_2 \frac{1}{\varepsilon'_2} \\ \frac{1}{\varepsilon'_s} &= 0,018 \cdot \frac{1}{5,051} + 0,982 \cdot \frac{1}{3,799} \\ \varepsilon'_s &= 3,816 \end{aligned} \quad (57)$$

Lichteneckerův logaritmický vztah:

$$\begin{aligned} \log \varepsilon'_s &= v_1 \log \varepsilon'_1 + v_2 \log \varepsilon'_2 \\ \log \varepsilon'_s &= 0,018 \cdot \log 5,051 + 0,982 \cdot \log 3,799 \\ \varepsilon'_s &= 3,818 \end{aligned} \quad (58)$$

Maxwellův vztah:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} &= 3 v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2 \varepsilon'_2} \\ \varepsilon'_s &= \left(3 v_1 \varepsilon'_2 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2 \varepsilon'_2} \right) + \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_s &= \left(3 \cdot 0,018 \cdot 3,799 \cdot \frac{5,051 - 3,799}{5,051 + 2 \cdot 3,799} \right) + 3,799 \\ \varepsilon'_s &= 3,819 \end{aligned} \quad (59)$$

Böttcherův vztah:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_s} &= 3 v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2 \varepsilon'_s} \\ \Rightarrow \varepsilon'_s \left(\varepsilon'_1 + 2 \varepsilon'_s - 2 \varepsilon'_2 - 3 v_1 \varepsilon'_1 + 3 v_1 \varepsilon'_2 \right) - \varepsilon'_1 \varepsilon'_2 &= 0 \\ \Rightarrow \varepsilon'_s \left(5,051 + 2 \varepsilon'_s - 2 \cdot 3,799 - 3 \cdot 0,018 \cdot 5,051 + 3 \cdot 0,018 \cdot 3,799 \right) &= 0 \\ - 5,051 \cdot 3,799 &= 0 \\ \varepsilon'_s &= 2\varepsilon'_s{}^2 - 2,614\varepsilon'_s - 19,189 = 0 \\ \varepsilon'_s &= 3,819 \end{aligned} \quad (60)$$

Tab. 8 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 2 % příměsí slídy

2 % příměsí slídy			
metoda výpočtu	vzorek číslo	vypočtené ϵ' (-)	změřené ϵ' (-)
Maxwellův vztah	1	3,810	3,826
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,811	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,808	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,810	
Böttcherův vztah		3,810	
Maxwellův vztah	2	3,810	3,819
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,811	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,808	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,810	
Böttcherův vztah		3,810	
Maxwellův vztah	3	3,811	3,813
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,812	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,809	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,810	
Böttcherův vztah		3,811	

Tab. 9 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 4 % příměsí slídy

4 % příměsí slídy			
metoda výpočtu	vzorek číslo	vypočtené ϵ' (-)	změřené ϵ' (-)
Maxwellův vztah	1	3,819	3,829
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,821	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,816	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,818	
Böttcherův vztah		3,819	
Maxwellův vztah	2	3,820	3,826
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,822	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,816	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,819	
Böttcherův vztah		3,820	
Maxwellův vztah	3	3,819	3,823
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,821	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,816	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,818	
Böttcherův vztah		3,819	

Tab. 10 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 6 % příměsí slídy

6 % příměsí slídy			
metoda výpočtu	vzorek číslo	vypočtené ϵ' (-)	změřené ϵ' (-)
Maxwellův vztah	1	3,832	3,835
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,835	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,827	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,831	
Böttcherův vztah		3,832	
Maxwellův vztah	2	3,830	3,849
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,833	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,825	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,829	
Böttcherův vztah		3,830	
Maxwellův vztah	3	3,829	3,834
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,832	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,824	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,828	
Böttcherův vztah		3,829	

Tab. 11 Přehled vypočtených hodnot relativní permitivity vzorků s 8 % příměsí slídy

8 % příměsí slídy			
metoda výpočtu	vzorek číslo	vypočtené ϵ' (-)	změřené ϵ' (-)
Maxwellův vztah	1	3,846	3,846
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,851	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,842	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,844	
Böttcherův vztah		3,846	
Maxwellův vztah	2	3,847	3,849
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,853	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,840	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,846	
Böttcherův vztah		3,847	
Maxwellův vztah	3	3,846	3,864
Lichteneckerův vztah pro $k = 1$		3,852	
Lichteneckerův vztah pro $k = -1$		3,839	
Lichteneckerův logaritmický vztah		3,845	
Böttcherův vztah		3,846	

Tab. 12 Přehled průměrných hodnot lakových vzorků s různým podílem plniva

Průměrné hodnoty lakových vzorků s různým podílem plniva			
metoda výpočtu	podíl slídy (%)	vypočtené ϵ' (-)	změřené ϵ' (-)
Maxwellův vztah	2	3,810	3,819
Lichteneckerův vztah pro k = 1			
Lichteneckerův vztah pro k = - 1			
Lichteneckerův logaritmický vztah			
Böttcherův vztah			
Maxwellův vztah	4	3,819	3,826
Lichteneckerův vztah pro k = 1			
Lichteneckerův vztah pro k = - 1			
Lichteneckerův logaritmický vztah			
Böttcherův vztah			
Maxwellův vztah	6	3,830	3,839
Lichteneckerův vztah pro k = 1			
Lichteneckerův vztah pro k = -1			
Lichteneckerův logaritmický vztah			
Böttcherův vztah			
Maxwellův vztah	8	3,846	3,853
Lichteneckerův vztah pro k = 1			
Lichteneckerův vztah pro k = -1			
Lichteneckerův logaritmický vztah			
Böttcherův vztah			
	slída Mica-M	5,051	5,051

3 Závěr

V prvním kroku této diplomové práce byla prostudována problematika plněných elektroizolačních laků a zpracován současný přehled těchto laků používaných v elektrotechnice. Následně byly prostudovány metody a nové možnosti testování elektroizolačních laků. Pro testování byla jako základní složka použita polyesterová pryskyřice Dolphon XL 2102. Byla aplikována střídavá a stejnosměrná metoda testování elektroizolačních laků (viz 2.7.1, 2.7.2). Po mnoha pokusech byla navržena metodika přípravy plněných lakových vzorků do hliníkových forem (viz kap. 2.6) a zhotoveny sady lakových vzorků s různým podílem plniva v podobě mikromleté slídy Mica-M. Experimentálně byl sledován vliv plniva na změny elektrických vlastností elektroizolačního laku.

Střídavou metodou bylo provedeno měření relativní permitivity a ztrátového čísla pro sady tří vzorků vytvrzené polyesterové pryskyřice bez příměsí slídy, se 2 % příměsí slídy, se 4 % příměsí slídy, se 6 % příměsí slídy a s 8 % příměsí slídy (viz obr. 28). Průměrná hodnota relativní permitivity čisté polyesterové pryskyřice vyšla 3,799 pro kmitočet 1 kHz, se 4 % příměsí slídy vyšla 3,826 pro kmitočet 1 kHz a s 8 % příměsí slídy vyšla 3,853 pro kmitočet 1 kHz. Tyto hodnoty s rostoucím kmitočtem klesají. Protože se jedná o malé koncentrace příměsí slídy, rozdíly hodnot relativní permitivity se pohybují v řádech desetin. Se zvyšující se koncentrací mikromleté slídy Mica-M se zvyšuje hodnota relativní permitivity i ztrátové číslo vzorků. Ztrátové číslo je v okolí kmitočtu 100 Hz téměř zanedbatelné, avšak od kmitočtu 1 kHz se ztrátové číslo začne zvyšovat. Tento jev je patrný se zvyšujícím se procentem plnění (viz obr. 30). Měření dielektrických veličin bylo ovlivněno nedokonalé rovinným povrchem vzorků, což mělo za následek vznik malých, ale ne zanedbatelných vzduchových mezer mezi zkoumaným vzorkem a přiloženými elektrodami. Vzduchové mezery snižovaly výslednou kapacitu vzorků, proto je zapotřebí klást důraz zejména na výrobu vzorků s co nejrovnějším povrchem. Vzorky bylo nutné dále vkládat do elektrodového systému ve stejné poloze při každém měření, aby byl maximálně eliminován vliv nerovnosti vzorků na výsledky opakovaných měření. Důležitá je také přesná kalibrace přístroje před zahájením měření.

Stejnou metodou bylo provedeno měření absorpčních charakteristik, tedy časové závislosti nabíjecího a vybíjecího proudu pro sady tří vzorků vytvrzené polyesterové pryskyřice bez příměsí slídy, se 2 % příměsí slídy, se 4 % příměsí slídy, se 6 % příměsí slídy a s 8 % příměsí slídy. Každý vzorek byl při napětí 500 V nabíjen po dobu jedné hodiny a následně po dobu jedné hodiny vybíjen. Z naměřených hodnot byly pro všechny vzorky vyneseny časové závislosti nabíjecího a vybíjecího proudu a vnitřní rezistivity.

Dosažené výsledky byly matematicky vyhodnoceny v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Pro ověření správnosti měření bylo na experimentálně zjištěné průběhy aplikováno pět

směsných vztahů (viz (56), (57), (58), (59) a (60)) a vypočteny hodnoty relativní permitivity pro dané podíly slídy ve vzorcích se (2 %, 4 %, 6 % a 8 %), viz tab. 8, tab. 9, tab. 10 a tab. 11.

Naměřené výsledky nejvíce odpovídají hodnotám vypočítaných za pomoci Maxwellova a Böttcherova směsného vztahu. Lze tedy konstatovat, že naměřené hodnoty se téměř shodují s vypočítanými hodnotami pomocí směsných vztahů (viz tab. 12).

Rezistivita plněných vzorků klesala se zvyšujícím se obsahem plniva (viz obr. 34). Z průběhů rezistivit (viz obr. 34) lze konstatovat, že s vyšším procentuelním plněním slídy Mica-M, rezistivita klesá, což odpovídá trendu obyčejných kompozitů. Může to být způsobeno nehomogonitou směsí, nečistotami nebo vzduchem. U obr. 30 je patrný velký nárůst ztrátového čísla od kmitočtu 1 kHz. Plněné vzorky se chovají jako polární látka. Relaxační polarizace jsou potvrzeny kmitočtovými charakteristikami ztrátového čísla a kmitočtovými charakteristikami relativní permitivity. Relaxační charakter se dá určit jak z průběhů tak i posuvu lokálních maxim ε'' .

Výsledky této diplomové práce prokazují, že vliv obsahu slídy na elektrické vlastnosti elektroizolačních laků je prakticky minimální. Slída je velmi choulostivá na přípravu vzorků. Nejchoulostivější fáze je mísení polyesterové pryskyřice se slídou. Vzniklá nehomogenita a chyby ve struktuře mohou mít za následek odlišné chování výsledného vzorku.

4 Seznam použité literatury

- [1] JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M., *Materiály a technická dokumentace, část Materiály v elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 129 stran.
- [2] LIEDERMANN, K., *Klimatotechnologie*. Brno: UETE Vysokého učení technického v Brně, 2006.
- [3] ČERNÝ, V. *Dielektrická spektra drážkové izolace v průběhu teplotního stárnutí*. [Diplomová práce]. FEKT VUT Brno, 2005.
- [4] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 1. vydání, 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [5] EMD - Chemicals Inc.: Slída Mica-A [online]. [cit. 2010-02-22]. Dostupné z WWW: www.emdchemicals.com/rona/2404.asp
- [6] HASSDENTEUFEL J., DUBSKÝ J., RAPOŠ M., ŠANDERA J., *Elektrotechnické materiály*, Bratislava: Nakladatelství ALFA, 1971, ISBN 65-553-71
- [7] ČSN EN 61033 Zkušební metody pro stanovení pevnosti spojení impregnačních prostředků k podložce typu lakovaný vodič [online]. 2007 [cit. 2010-03-15]. Dostupné z WWW: www.shop.normy.biz/d.php?k=785544
- [8] JIRÁK, J. *Materiály a technická dokumentace*. Interní učební texty. FEKT VUT Brno, 2004
- [9] MATOUŠEK, V. *Dielektrická spektra plošného kompozitu v průběhu teplotního stárnutí*. [Diplomová práce]. FEKT VUT Brno, 2006.
- [10] KOČMAN, V. *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů – Isolanty A*. Skripta FE VUT Brno. SNTL Praha, 1971
- [11] HP 16451B Precision LCR meter-Operation manual. Hewlett-Packart, LTD, Yokogava 1989
- [12] Agilent E4980A Precision LCR Meter [online]. [cit. 2010-03-22]. Dostupný z WWW: <http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=715495&pageMode=OV&cc=US&lc=eng>
- [13] AGILENT TECHNOLOGIES, Palo Alto. *Agilent E4980A Precision LCR Meter - Operation Manual*. US, 2000. [cit. 2010-03-24]. Dostupný z WWW: <http://www.testequipmentdepot.com/agilent/pdf/e4980emanual.pdf>
- [14] ROZSÍVALOVÁ, Z., KŘIVÁK, P.: *Materiály a technická dokumentace-Laboratorní cvičení*. Interní učební texty. FEKT VUT Brno, 2004

- [15] Digitální váha RADWAG AS 220/C/2 [online]. 2010 [cit. 2010-05-6]. Dostupný z WWW:www.vahynejelepe.cz/eshop/index.php?main_page=product_info&products_id=172
- [16] Elektroizolační laky [online]. 2010 [cit. 2010-03-28]. Dostupný z WWW:www.ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?reload=true&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel1%2F57%2F4394%2F00168889.pdf%3Farnumber%3D168889&authDecision=-203