



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 DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ SLÍDOVÉ IZOLACE V PRŮBĚHU NAVLHÁVÁNÍ

ANALYSIS OF DIELECTRIC PROPERTIES OF MICA-BASED INSULATION IN COURSE
MOISTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

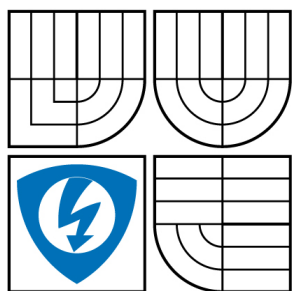
DMITRIJ YAKYMETS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Yakymets Dmitrij

ID: 83117

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Analýza dielektrických vlastností slídové izolace v průběhu navlhávání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi využití dielektrické relaxační spektroskopie pro získání informací o vztahu složení, struktury a vlastností látek.

Experimentálně prošetřete vliv relativní vlhkosti a tepelného namáhání na dielektrické vlastnosti slídového kompozitního materiálu. Pozornost soustředte především na kmitočtové průběhy obou složek komplexní permitivity.

Metodiku experimentu přizpůsobte dosavadním zkušenostem a přístrojovému vybavení ústavu elektrotechnologie.

Výsledky měření vyhodnoťte z hlediska využití v technické praxi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsívalová

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

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 užívat, 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:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt:

Přdložena bakalářská práce sleduje změnu základních dielektrických vlastností tepelně namáhaného materiálu RELANEX v průběhu navlhávání. Na vzorcích materiálu byly měřeny hodnoty kapacity, ztrátového činitele $\text{tg } d$ v kmitočtovém rozsahu 100 Hz - 1 MHz, při relativních vlhkostech 0 %, 33%, 75%, 95% a při pokojové teplotě.

Abstract:

Bachelor's thesis monitors changes of the basic properties of dielectric material Relanex during humidity of the samples material. They were measured values of capacity, and dissipation factor $\text{tg } d$ in the frequency range 100Hz - 1MHz in relative humidity 0 %, 33%, 75%, 95% at room temperature.

Klíčová slova:

Permitivita, Ztrátové číslo, Vlhkost, Kapacita, RELANEX.

Keywords:

Permittivity, Dissipation factor, Humidity, Capacity, RELANEX.

Bibliografická citace díla:

YAKYMETS, D. *Analýza dielektrických vlastností slídové izolace v průběhu navlhávání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsívalová.

Prohlášení autora o původnosti díla:

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

V Brně dne 29. 5. 2008

.....

Poděkování:

Rád bych poděkoval Ing. Zdence Rozsivalové, vedoucí bakalářské práce, za velmi cenné rady při hledání informací o studované problematice, a realizace této práce.

OBSAH

ÚVOD	10
2 TEORETICKÝ ÚVOD	11
2.1 VLASTNOSTI DIELEKTRIK	11
2.1.1 Charakteristika dielektrik	11
2.1.2 Dielektrická polarizace	11
2.1.3 Druhy polarizací dielektrik	13
2.1.4 Komplexní permitivita a dielektrické ztráty	16
2.2 DIELEKTRICKÁ RELAXAČNÍ SPEKTROSKOPIE	20
2.2.1 Princip dielektrické relaxační spektroskopie	20
2.2.2 Funkce rozložení relaxačních dob	20
2.2.3 Empirické funkce pro rozložení relaxačních dob	22
2.3 VLHKOST A NAVLHAVOST LÁTEK	24
2.3.1 Vlhkost vzduchu	24
2.3.2 Navlhavost (hygroskopičnost)	25
2.3.3 Hygrostaty	27
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
3.1 VLASTNOSTI MĚŘENÉHO VZORKŮ (RELANEX)	29
3.2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	29
3.3 PŘÍPRAVA VZORKU	30
3.4 PRŮBĚH MĚŘENÍ	31
3.5 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI	31
3.6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	36
4 ZÁVĚR	37
5 POUŽITÁ LITERATURA	38

Seznam obrázků

Obr. 1 Vektorový diagram elektrické indukce, intenzity elektrického pole a komplexní permitivity	16
Obr. 2 Průběh složek ε' a ε'' komplexní permitivity v závislosti na kruhovém kmitočtu ω (dielektrická disperze).....	18
Obr. 3 Coleho–Coleho kruhový diagram klasického Debyeova průběhu $\varepsilon^* = F(\omega)$ při $g =$ konst.....	19
Obr. 4 Coleho-Coleho kruhový diagram při distribuci relaxačních dob.....	20
Obr. 5 Coleho-Davidsonovo (CD) rozdělení	22
Obr. 6 Havrilakovo – Negamiho rozdělení	23
Obr. 7 Teplotní závislost Φ_{\max} vzduchu nasyceného vodními parami.....	24
Obr. 8 Závislost rovnovážné koncentrace sorbenda na tlaku při konstantní teplotě.....	26
Obr. 9 Navlhání a vysoušení materiálu při dané vlhkosti a čase.....	27
Obr. 10 Tříelektrodový systém.....	30
Obr. 11 Závislost permitivity na frekvenci vybraného vzorku (100 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti.....	31
Obr. 12 Závislost permitivity na frekvenci vybraného vzorku (500 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti.....	32
Obr. 13 Závislost permitivity na frekvenci vybraného vzorku (1000 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti.....	32
Obr. 14 Závislost ztrátového čísla na frekvenci vybraného vzorku (100 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti	33
Obr. 15 Závislost ztrátového čísla na frekvenci vybraného vzorku (500 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti	33
Obr. 16 Závislost ztrátového čísla na frekvenci vybraného vzorku (1000 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti	34
Obr. 17 Frekvenční závislost permitivity s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 10 %.....	34
Obr. 18 Frekvenční závislost permitivity s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 75 %.....	35
Obr. 19 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 10 %.....	35
Obr. 20 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 75 %.....	36

Seznam tabulek

Tab. 1 Definovaná vlhkost roztoků soli	30
--	----

Úvod

V dnešní době patří k zásadním požadavkům při provozu elektrických zařízení a strojů vysoká spolehlivost a bezpečnost. Tyto požadavky se odrážejí ve zvýšených nárocích na kvalitu všech součástí, především izolačního systému.

K izolacím drážek vysokonapěťových strojů se často využívají kompozitní materiály na bázi slídy. Základními složkami materiálu jsou zpravidla sklo, respektive skelná tkanina, slídový papír a pojivo, většinou epoxidová pryskyřice, v některých případech i jiné materiály.

Bakalářská práce se zabývá problematikou analýzy dielektrických vlastností, především frekvenčních závislostí obou složek komplexní permitivity, v průběhu navlhávání a následné změny dielektrických vlastností elektroizolačního slídového materiálu Relanex při různých relativních vlhkostech.

2 Teoretický úvod

2.1 Vlastnosti dielektrik

2.1.1 Charakteristika dielektrik

Za ideální dielektrikum se považuje látka, složená výhradně z nábojů vzájemně vázaných elektrostatickými silami, neobsahující volně pohyblivé elektrické náboje. Všechny elektroizolační látky běžně používané v elektrotechnické praxi však obsahují relativně velmi malá množství volných nábojů (elektronů, kladných a záporných iontů nebo koloidních částic), které se působením vnějšího elektrického pole mohou s určitou volností v látce pohybovat. Reálné dielektrikum je tedy v nepatrné míře vodivé. Proto i v slabém elektrickém poli jím protéká malý, nikoli však zanedbatelný proud. [3]

Reálné izolanty lze charakterizovat základními elektrickými veličinami, kterými jsou:

- relativní permitivita ε' (-)
- ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ (-)
- vnitřní rezistivita ρ_v (Ωm)
- povrchová rezistivita ρ_p (Ω)
- elektrická pevnost E_p (Vm^{-1})

Každý izolant lze považovat za dielektrikum, ale ne všechna dielektrika jsou izolanty. O dielektriku se hovoří v souvislosti s polarizovatelností jeho kladných a záporných nábojů, které jsou vzájemně vázány elektrostatickými silami. Následkem své polarizovatelnosti je materiál schopen akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii. V ideálním dielektriku, které neobsahuje volné nosiče elektrického náboje, by se elektrické pole udrželo po neomezeně dlouhou dobu.

2.1.2 Dielektrická polarizace

Polarizaci představuje fyzikální jev, při němž se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole posouvají (přemisťují) elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových, na malé omezené vzdálenosti, a obsahuje-li látka dipólové molekuly, orientují se (natáčejí se) tyto molekuly do směru pole. Za určitých podmínek jsou i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace. Mírou polarizace v látce je vektor polarizace

\vec{P} (Cm^{-2}) a relativní permitivita ε' . Základní fyzikální vlastností všech dielektrik je proces polarizace. S procesem polarizace souvisí permitivita dielektrika ε' a ztrátový činitel $\text{tg } \delta$, který je mírou dielektrických ztrát. S oběma veličinami souvisí dielektrické ztráty a s nimi pak další jevy, zejména stárnutí organických dielektrik a jejich životnost. Proto je velikost ε' a $\text{tg } \delta$ za různých podmínek základním kritériem při volbě materiálu k výrobě dielektrik pro jakékoli konkrétní aplikace. [1]

Pro vektor polarizace dielektrika \vec{P} platí:

$$\vec{P} = \frac{\sum \mu_i}{V}, \quad (1)$$

kde $\sum \mu_i$ je součet elementárních dipólových momentů všech polarizovaných částic v objemu V (m^3), orientovaných ve směru působení elektrického pole. Polarizace \vec{P} je v určitém místě rovna dipólovému momentu vztahenému na jednotku objemu.

Vztah mezi vektorem polarizace dielektrika \vec{P} a vektorem elektrické indukce \vec{D} vyjadřují rovnice:

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 + \vec{P} \quad (2)$$

a

$$\vec{P} = \vec{D} - \vec{D}_0 = (\varepsilon' - 1)\varepsilon_0 \vec{E}_0 = \kappa \varepsilon_0 \vec{E}_0, \quad (3)$$

kde \vec{D}_0 (Cm^{-2}) je elektrická indukce ve vakuu, \vec{E}_0 (Vm^{-1}) je intenzita elektrického pole ve vakuu, ε_0 (Fm^{-1}) je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$) a κ (-) je dielektrická susceptibilita.

Pro závislost mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole platí vztah

$$\vec{D} = \varepsilon' \varepsilon_0 \vec{E}_0 = \varepsilon' \vec{D}_0. \quad (4)$$

V dielektrikách se často vyskytuje současně několik druhů polarizací, přičemž slabší polarizace bývají překryty mechanismy silnějšími. [2]

Zvýšení elektrické indukce \vec{D} v důsledku polarizace se při konstantní intenzitě \vec{E} projeví zvětšením náboje na elektrodách kondenzátoru. Tohoto jevu je využíváno při praktickém určování relativní permitivity, kdy se měření elektrické indukce, resp. náboje, převádí na měření kapacity. Vychází se ze vztahu

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (5)$$

v němž C_x (F) je kapacita měřeného kondenzátoru s vloženým dielektrikem a C_0 (F) je geometrická kapacita shodného měřicího systému, u něhož je místo původního dielektrika vakuum. Její hodnota se zpravidla neměří, ale počítá se z rozměrů elektrodového systému.

Hodnota relativní permitivity vakua je rovna jedné, neboť ve vakuu nemůže ze zřejmých příčin k polarizaci docházet. Pro jakoukoliv jinou polarizovatelnou látku nabývá hodnot větších než jedna. Její velikost se pohybuje od hodnot o málo větších než jedna pro plynné izolanty přes hodnoty řádově několika jednotek až desítek pro izolační materiály ve skupenství kapalném a pevném. U feroelektrik dosahuje až hodnot řádově 10^4 . Velikost relativní permitivity je určena uplatňujícími se polarizačními mechanismy. Není materiálovou konstantou, neboť se u ní projevuje zpravidla značná teplotní, kmitočtová a u feroelektrik i napěťová závislost. Proto se musí ke každému číselnému údaji o permitivitě přiřadit popis vnějších podmínek, za nichž byla stanovena. [3]

2.1.3 Druhy polarizací dielektrik

Klasifikace polarizačních mechanismů:

A. polarizace rychlé (pružné)	B. polarizace pomalé (relaxační)	C. polarizace zvláštní
polarizace elektronová	polarizace dipólová	polarizace mezivrstevová (migrační)
polarizace iontová (pružná)	polarizace iontová relaxační	polarizace samovolná (spontánní)
		polarizace trvalá (permanentní)
		polarizace rezonanční

Pružné polarizace

Pružné polarizace jsou jevy s rychlým průběhem, zvané také rychlé polarizace. Spočívají v posunu pružně vázaných nábojů v částicích dielektrika z jejich rovnovážných poloh, přičemž se posouvají stejná množství kladných a záporných nábojů v opačných směrech. Tyto polarizace se vyznačují extrémně krátkou dobou trvání, proběhnou prakticky okamžitě, pružně a bez ztrát energie. Rychlé polarizace jsou tepelně nezávislé v celém rozsahu kmitočtů používaných v elektrotechnice, ale projevuje se u nich teplotní závislost.

Elektronová polarizace se vyskytuje u látek všech druhů skupenství, a tedy i u všech dielektrik. Působením vnějšího elektrického pole se elektrické náboje přemístí (posunou) ze svých rovnovážných poloh do poloh nových, jejichž vzdálenosti jsou malé, tedy menší než jsou rozměry atomů nebo molekul. Doba ustálení je řádově 10^{-16} až 10^{-14} s. V kmitočtovém intervalu od 10^{-5} do 10^{10} Hz, používaném v dielektrické relaxační spektroskopii, vytváří pouze konstantní příspěvek k reálné složce komplexní permitivity a nulový příspěvek k její složce imaginární. Se vzrůstající teplotou se však tato polarizace zmenšuje, následkem tepelné roztažnosti látek se zmenšuje počet částic v jednotce objemu.

Iontová polarizace se vyskytuje v iontových krystalech, tj. v tuhých látkách s iontovou vazbou. Ionty, vzájemně vázané elektrostatickými silami, se působením vnějšího elektrického pole pružně posunou, kladné ve směru pole a záporné opačně. Vzhledem k pružnému posunu iontů je tento jev znám také pod označením pružná (elastická) iontová polarizace. Jejím následkem je změna velikosti a směru dipólového momentu. Její charakteristická doba odezvy je 10^{-13} – 10^{-11} s.

Relaxační polarizace

Relaxační polarizace jsou jevy s pomalým průběhem. Různé polární částice, které jsou se sousedními částicemi slaběji vázané, konají kmitavé pohyby a zároveň se vlivem tepelných pohybů chaoticky přemísťují na vzdálenosti přibližně rozměrů molekul. Začne-li působit vnější elektrické pole, jsou jeho účinkem tyto chaotické tepelné pohyby částečně překonány a usměrněny, přičemž se nosiče nábojů zároveň natáčejí do směru (nebo proti směru) elektrického pole. Tím vznikne nesymetrické rozložení nábojů v dielektriku a následkem toho vzroste dipólový moment.

Označení těchto polarizací jako relaxační je dáno tím, že od okamžiku, kdy začne působit elektrické pole, přibývá polarizace pomalu a s opožděním, naopak přestane-li elektrické pole působit, polarizace pomalu ubývá. Proto doby potřebné k ustálení těchto jevů, jsou poměrně

dlouhé – odtud název pomalé polarizace. Časový průběh jejich doznívání lze vyjádřit exponenciální závislostí, charakterizovanou časovou konstantou $\tau(s)$, nazývanou těž relaxační dobou.

Pomalé polarizace značně závisí na teplotě – tím na tepelném pohybu částic, jehož energie je příčinou přemístění částic z jejich rovnovážných poloh, přičemž elektrické pole toto přemístění jen orientuje do svého směru. Proto se často označují jako polarizace tepelné nebo teplotně závislé. Jsou vždy provázeny ztrátami energie v dielektriku, způsobující jeho ohřev.

Polarizace dipólová (tepelná dipólová nebo orientační polarizace) je nejdůležitější relaxační polarizací, která se vyskytuje v látkách, v nichž jsou dipólové molekuly jen velmi slabě vázány anebo úplně volné, takže působením vnějšího elektrického pole se mohou natáčet do směru silových čar pole. Doba ustálení u dipólové polarizace u látek nízkomolekulárních je 10^{-12} - 10^{-8} s, u makromolekulárních látek může dosahovat hodnot o mnoho řádů vyšších.

Polarizace iontová - relaxační je nejjednodušším případem tepelné polarizace iontů. Probíhá v dielektrikách složených z iontů nebo obsahujících skupiny molekul nebo atomů, polární radikály i volné ionty příměsí nebo nečistot, které jsou slabě vázány k sousedním částicím a snadno reagují na vnější elektrické pole. Vyskytuje se v anorganických sklech, v keramických látkách s podílem skelné fáze, v anorganických krystalických látkách s iontovou vazbou a netěsným uložením částic. Doba ustálení je 10^{-12} - 10^{-8} s.

Polarizace zvláštní

Skupina zvláštních polarizací zahrnuje polarizaci mezivrstvou, samovolnou, trvalou a rezonanční.

Polarizace mezivrstvou je podmíněna makroskopickou nehomogenitou některých reálných dielektrik, která obsahují různě pohyblivé volné ionty nečistot a příměsí nebo slabě vázané nosiče nábojů. Mezivrstvou polarizace je nejpomalejší ze všech druhů polarizací. Závisí na teplotě a na kmitočtu. Je polarizací nepružnou, provázenou ztrátou energie.

Polarizace permanentní (trvalá) se vyskytuje v některých polárních látkách s malou elektrickou vodivostí (vosky, pryskyřice). Tento druh polarizace je využíván u elektretů.

Polarizace spontánní (samovolná) se vyskytuje v látkách feroelektrických (siegnettoelektrických), které se vyznačují výjimečně velkou dielektrickou susceptibilitou,

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (10)$$

kde úhel $\delta(^{\circ})$ se nazývá ztrátovým úhlem a veličina $\operatorname{tg} \delta(-)$ ztrátovým činitelem.

Následkem dielektrické polarizace se vektor elektrické indukce $\vec{D}(t)$ vždy opožďuje za vektorem elektrické intenzity $\vec{E}(t)$. Proto není $\vec{D}(t)$ ve fázi s $\vec{E}(t)$, nýbrž mezi amplitudami $\vec{D}(t)$ a $\vec{E}(t)$ (Vm^{-1}) je ztrátový úhel δ .

Permitivita dielektrika je komplexní veličinou, která se značí ε^* . Skládá se ze dvou složek ε' a ε'' , kde $\varepsilon'(\omega)$ je reálná složka, která představuje míru kapacitního charakteru dielektrika. Je funkcí kmitočtu elektrického pole a vyjadřuje chování technického dielektrika ve střídavém elektrickém poli.

Její limitní hodnoty bývají označovány jako:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon'(\omega) \rightarrow \varepsilon_s \text{ je statická relativní permitivita} \quad (11)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon'(\omega) \rightarrow \varepsilon_{\infty} \text{ je optická relativní permitivita} \quad (12)$$

a $\varepsilon''(\omega)$ je imaginární složka úměrná ztrátám v dielektriku, nazývaná ztrátovým číslem, přičemž

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon''(\omega) \rightarrow 0 \quad (13)$$

Komplexní permitivita je vyjádřena vztahem

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

Debye odvodil pro komplexní permitivitu vztah

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}, \quad (15)$$

kde τ (s) je relaxační doba, která je funkcí teploty.

Rozložením vztahu (15) na část reálnou a imaginární, vyplynou pro ε' a ε'' tyto vztahy:

(16)

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

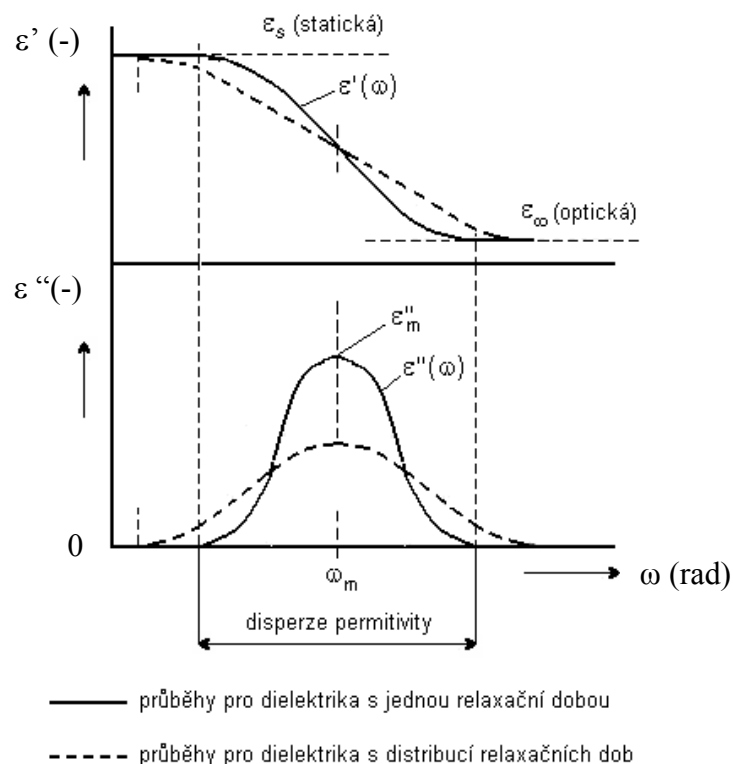
(17)

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

(18)

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

Pro většinu dielektrik má závislost $\varepsilon' = F(\omega)$ kvalitativní průběh znázorněný na Obr. 2, kde ε' s rostoucím kmitočtem plynule klesá z největší hodnoty ε_s (statické) na nejmenší hodnotu ε_∞ (optickou), kdežto závislost $\varepsilon'' = F(\omega)$ prochází maximem právě v místě nejpříkřejšího poklesu $\varepsilon'(\omega)$, tj. v inflexním bodě funkce $\varepsilon'(\omega)$. Dielektrické ztráty mizí při limitních kmitočtech: $\omega \rightarrow 0$ a $\omega \rightarrow \infty$, kdy se kondenzátor s ideálním dielektrikem chová jako ideální kapacita. Oblast, v níž relativní permitivita klesá s kmitočtem, se nazývá oblastí kmitočtové disperze nebo anomální disperzí a je definována jako změna permitivity dielektrika se změnou kmitočtu elektrického pole.



Obr. 2 Průběh složek ε' a ε'' komplexní permitivity v závislosti na kruhovém kmitočtu ω (dielektrická disperze)

Úpravou rovnic (16) a (17) vyplývá vztah pro ε''

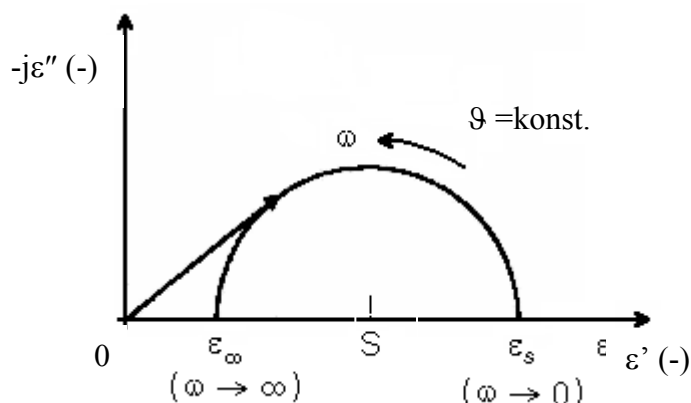
$$\varepsilon''^2 = (\varepsilon' - \varepsilon_\infty)(\varepsilon_s - \varepsilon'), \quad (19)$$

Úpravou vztahu (19) lze získat rovnici kružnice

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

o poloměru $R = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}$ a středu S o souřadnicích $S \left[\frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} ; 0 \right]$.

Grafickým znázorněním rovnice (20) je Coleho–Coleho kruhový diagram. Vynesené hodnoty ε' a ε'' v komplexní rovině ve tvaru $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$ při konstantní teplotě opisují kruhový oblouk, který protíná reálnou osu ε' v bodech ε_s a ε_∞ . Tento oblouk je geometrickým místem koncových bodů vektorů ε^* při změně kmitočtu a vyjadřuje kmitočtovou závislost ε^* při konstantní teplotě \mathcal{G} .



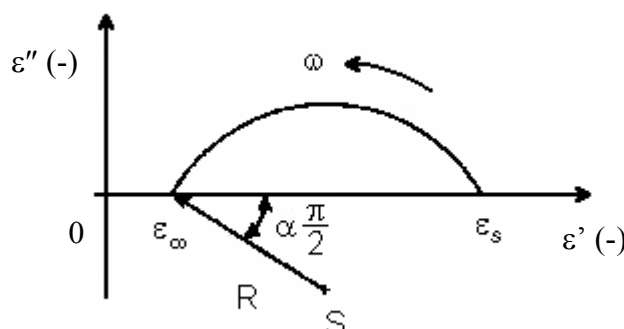
Obr. 3 Coleho–Coleho kruhový diagram klasického Debyeova průběhu $\varepsilon^* = F(\omega)$ při $\mathcal{G} = \text{konst.}$

Coleho-Coleho kruhový diagram podle Obr. 3 platí pouze v jednodušších případech, kdy se všechny polární molekuly chovají stejně a přitom na sebe nepůsobí. Pak existuje jen jeden relaxační průběh s jednou relaxační dobou τ . U většiny dielektrik se vyskytuje několik druhů dipólových molekul s různým rozložením relaxačních dob. V tomto případě je třeba zavést pojem distribuční funkce. Pro tento případ se používá upravená Debyeova rovnice ve tvaru (21). Tato rovnice pak odpovídá Coleho-Coleho kruhovému diagramu z Obr. 4 se středem pod osou ε' .

Tento případ popisuje rovnice

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}}, \quad (21)$$

kde $\alpha (-)$ je distribuční parametr v intervalu $\langle 0 < \alpha < 1 \rangle$ [2]



Obr. 4 Coleho-Coleho kruhový diagram při distribuci relaxačních dob

2.2 Dielektrická relaxační spektroskopie

2.2.1 Princip dielektrické relaxační spektroskopie

Dielektrická relaxační spektroskopie (DRS) se zabývá získáváním poznatků o jednotlivých relaxačních a vodivostních procesech vyskytujících se ve zkoumaném dielektriku a směřuje k nalezení vhodné fyzikální interpretace na mikroskopické úrovni. Pro analýzu experimentálních poznatků je nezbytné výsledky měření vhodně matematicky popsat, tj. přiřadit jim číselné charakteristiky.

2.2.2 Funkce rozložení relaxačních dob

Zavádí se funkce $g(\tau)$ a nazývá se hustota pravděpodobnosti rozložení relaxačních dob, krátce rozložení relaxačních dob. Tato funkce charakterizuje, jak jsou v dielektriku zastoupeny jednotlivé relaxační doby. Pokud vykazují všechny polarizace schopné částice v dielektriku tutéž shodnou relaxační dobu τ_0 , redukuje se $g(\tau)$ na jednotkový Diracův impuls. Funkce $g(\tau)$ není však pro znázornění relaxačních mechanismů v dielektriku nejvhodnější, protože pro velmi malá τ se $g(\tau) \rightarrow \infty$. Proto je často nahrazována funkcí $G(\tau) = \tau g(\tau)$, zapisovanou někdy jako $G(\ln \tau)$.

Z experimentálního hlediska je v dielektrické relaxační spektroskopii v zásadě možné použití několika základních přístupů. Experimentem získané závislosti (funkce) $\varepsilon^*(\omega)$ (v případě DRS v kmitočtové oblasti) a $i(t)$ je možné fyzikálně poměrně jednoduše interpretovat vzhledem k jejich souvislosti s dipólovou korelační funkcí $\lambda(t)$, jakožto základní mikrofyzikální charakteristikou dielektrika. Současná experimentální technika navíc dovoluje jejich relativně snadné měření.

Výchozími veličinami pro analýzu dielektrického spektra jsou funkce $\varepsilon^*(\omega)$, resp. $\varepsilon'(\omega)$ a $\varepsilon''(\omega)$, a dále $i(t)$, popřípadě rozložení relaxačních dob (RRD) $G(\tau)$ (Obr. 5). Z analytického hlediska jsou všechny tyto funkce ekvivalentní transformace sebe navzájem. Z hlediska praktického se situace ovšem liší. Rozložení relaxačních dob $G(\tau)$ není vůbec experimentálně měřitelné; při měření a vyhodnocování zbývajících tří funkcí $\varepsilon'(\omega)$, $i(t)$ se vyskytují zejména tyto potíže:

- veličiny jsou změřeny vždy pouze s konečnou přesností, tj. měří se součet skutečné hodnoty a hodnoty experimentálního šumu,
- všechny veličiny jsou porovnatelné pouze v konečném časovém, popřípadě kmitočtovém intervalu,
- při měření nabíjecího proudu $i(t)$ se měří současně i vodivostní proud,
- vybíjecí proud je obecně závislý i na době nabíjení dielektrika.

Při měření všech tří uvedených funkcí se pak připojují další problémy experimentálního charakteru, např. rozlišení odezvy měřicího obvodu od odezvy měřeného dielektrika, teplotní drift aj.

Při analýze dielektrických spekter se postupuje v zásadě dvojitým způsobem. Jednou možností je přímý výpočet funkce RRD, tedy $G(\tau)$ z hodnot obou složek komplexní permitivity a vybíjecího proudu, experimentálně stanovených ve vhodných diskrétních bodech (kmitočtech nebo časech), popř. přímý výpočet všech ostatních chybějících funkcí.

Druhá metoda zpracování dielektrických dat spočívá ve volbě jedné z navržených nebo teoretických funkcí, přičemž se hledají konkrétní číselní hodnoty parametrů vystupujících v těchto funkcích, ale vyskytují se i jiné způsoby, jak definovat shodu mezi analytickým a experimentálně naměřeným průběhem. Tato metoda se označuje jako fitování.

2.2.3 Empirické funkce pro rozložení relaxačních dob

Tvary jednotlivých funkcí, které se při experimentálním studiu dielektrické relaxace pozorují, jsou až na výjimky v odlišných systémech podobné. Všechny empirické funkce obsahují několik málo parametrů, načež se v dielektrické relaxační spektroskopii studuje závislost těchto parametrů na vnějších faktorech jako jsou teplota, intenzita elektrického pole, tlak či koncentrace.

a) Coleho-Coleho (CC) rozdělení

Toto rozdělení je podrobně popsáno v [2]. Vztah, jímž je popisována komplexní permitivita má tvar

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}}, \quad (22)$$

kde $\alpha (-)$ je distribuční parametr v intervalu $\langle 0 < \alpha < 1 \rangle$.

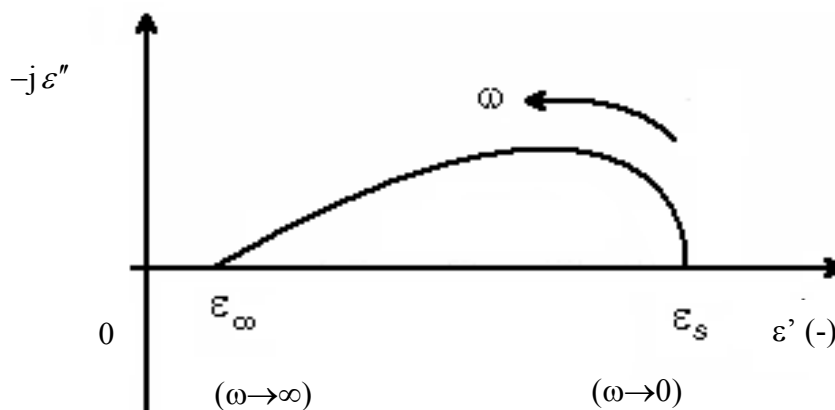
b) Coleho-Davidsonovo (CD) rozdělení

U tohoto rozdělení bývá komplexní permitivita popisována vztahem:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau_0)^\beta}. \quad (23)$$

kde $\beta (-)$ je parametr v intervalu $\langle 0 < \beta < 1 \rangle$.

V komplexní rovině se tato funkce zobrazí jako deformovaná polokružnice, zploštěná směrem k vysokým kmitočtům (tj. nalevo), viz Obr. 6.

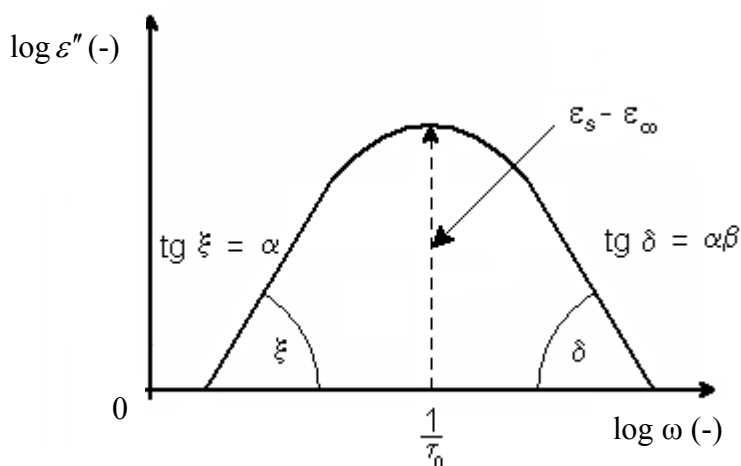


Obr. 5 Coleho-Davidsonovo (CD) rozdělení

c) Havrilakovo – Negamiho (HN) rozdělení

Toto rozdělení vzniklo na základě vyhodnocení rozsáhlého souboru experimentálních dat kombinací obou předchozích rozložení relaxačních dob, tj. (22) a (23). Pro komplexní permitivitu zde platí

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}]^\beta} \quad (24)$$



Obr. 6 Havrilakovo – Negamiho rozdělení

Na první pohled je zřejmé, že toto rozložení musí popisovat řadu experimentálních souborů dat lépe než obě předchozí. Obsahuje totiž čtyři nezávislé volitelné parametry α , β , $\varepsilon_s - \varepsilon_\infty$, τ_0 , zatím co v Coleho-Coleho i Coleho-Davidsonově jsou nezávislé parametry pouze tři. Je však třeba pamatovat na to, že zvyšování počtu parametrů sice vede ke zlepšení shody příslušné funkční závislosti s experimentem, není však žádnou zárukou dokonalejší fyzikální interpretace experimentem získaných dat. Havrilakovo-Negamiho rozdělení má tu významnou vlastnost, že v logaritmickeho – logaritmickech souřadnicích je závislost $\varepsilon'' = F(\omega)$ tvořena dvěma přímkami se směrnici α pro $\omega \ll 1/\tau_0$ a $\alpha\beta$ pro $\omega \gg 1/\tau_0$. To znamená, že parametry α a β mají názornou geometrickou interpretaci, a proto se Havrilakovo-Negamiho rozdělení velice často používá pro popis dielektrické relaxace. [5]

2.3 Vlhkost a navlhavost látek

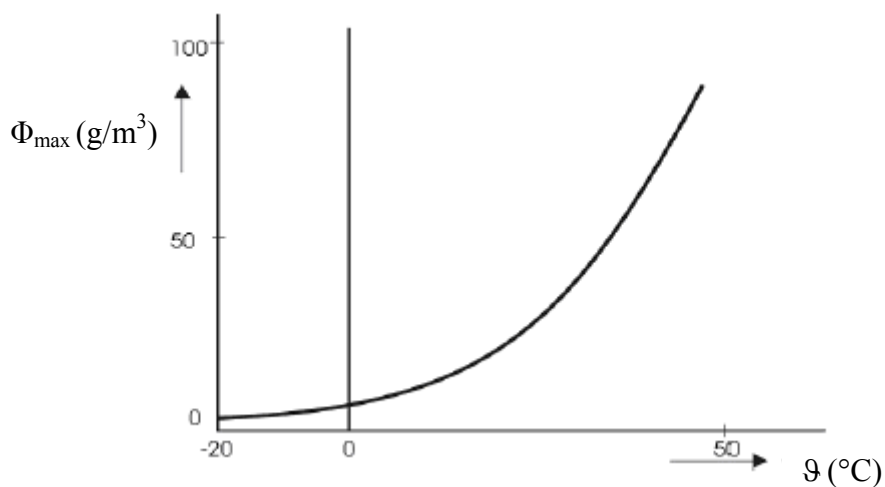
2.3.1 Vlhkost vzduchu

Jednou z nejčastějších a nejdůležitějších příčin znehodnocování dielektrik je navlhání. Při posuzování elektrických vlastností většiny dielektrik má rozhodující význam jejich chování ve styku s vodní párou. Při styku s vodní párou materiál navlhá a pak se jedná o navlhavost neboli hygroskopičnost dielektrik. Při ponoření do vody nebo jiného kapalného prostředí pohlcuje kapalinu, v tomto případě jde o nasákavost. Vlivem navlhavosti a nasákavosti se více nebo méně zhoršují elektrické vlastnosti dielektrik, zejména se zmenšuje vnitřní povrchový odpor, zvětšuje se ztrátový činitel a klesá elektrická pevnost. Rovněž relativní permitivita vzrůstá vzhledem k vysoké relativní permitivitě vody, jejíž hodnota je rovna 81.

Podle povahy dielektrika a vnějších podmínek závisí změny vlastností dielektrik následkem působení vodních par na třech rozličných jevech - na jevu povrchovém (adsorpce molekul vody, smáčení povrchu tuhých látek kapalinami), na jevu objemovém (sycení dielektrika vlhkostí) a na propustnosti par a plynů vrstvou (stěnou) dielektrika.

Rozhodující vliv na navlhání materiálu má množství vodních par ve vzduchu (nebo jiném plynu), které se vyjadřuje buď absolutní nebo relativní vlhkostí prostředí.

Absolutní vlhkost Φ (gcm^{-3}) vzduchu je hmotnost m vodní páry obsažené v jednotce jeho objemu. Hodnota Φ_{max} silně závisí na teplotě, jak je patrné z Obr. 8. Maximální hodnotu absolutní vlhkosti Φ_{max} za určité teploty má vzduch, který je vodními parami nasycen. Větší množství už vzduch nemůže obsahovat, neboť by se srážela ve formě rosy.



Obr. 7 Teplotní závislost Φ_{max} vzduchu nasyceného vodními parami

Relativní vlhkost φ je dána poměrem absolutní vlhkosti plynu za daných podmínek a absolutní vlhkosti plynu s nasycenými vodními parami za téže teploty a tlaku. Její hodnota se udává většinou v procentech

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (25)$$

Za „suchý“ se považuje vzduch s obsahem vody pod 50 %, normálně vlhký vzduch 70 – 85 %, vlhký vzduch 90 % i více. Obvykle se relativní vlhkost vzduchu pohybuje v mezích asi 45 – 75 %. Normálním prostředím při zkoušení tuhých elektroizolačních materiálů je teplota 23 ± 2 °C a relativní vlhkost 50 ± 5 %. Nepožaduje-li se jinak, zkoušejí se vzorky v prostředí místnosti, tj. při teplotě 15 až 35 °C a 45 - 75 % relativní vlhkosti [2]

2.3.2 Navlhavost (hygroskopičnost)

Navlhavost je vlastnost materiálu přijímat vlhkost z okolního ovzduší. Základním dějem přitom je absorpce molekul vody. Adsorpce molekul je důsledkem působení adsorpčních sil mezi sorbentem a sorbendem. Adsorpce se uplatňuje především na povrchu látky, kde se molekuly vody usazují, současně však molekuly mohou pronikat do materiálu; v tomto případě jde o absorpci. Není-li jasné, o který z obou jevů jde, je použito označení „sorpce“. Látka přijímající páru se nazývá sorbent, látka sorbovaná je sorbendum.

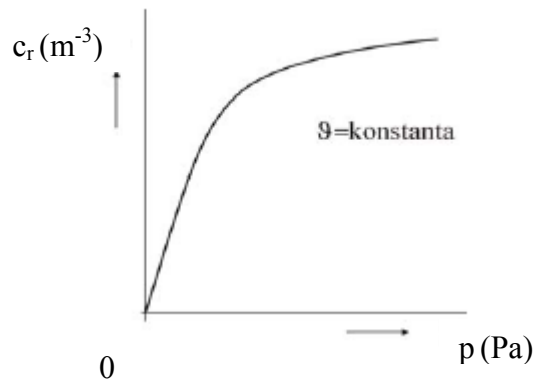
Rovnovážná koncentrace c_r (m^{-3}) daného sorbenda, tj. sorbované množství (plynu) v sorbentu závisí na jeho tlaku p (Pa) a teplotě ϑ (°C), takže pro její rovnovážný stav platí

$$c_r = F(p, \vartheta). \quad (26)$$

Závislost rovnovážné koncentrace na tlaku při konstantní teplotě se nazývá sorpční izotermou, jejíž rovnice je

$$c_r = F(p)_{\vartheta}. \quad (27)$$

V praxi často se vyskytující průběh izotermy je uveden na Obr. 8.



Obr. 8 Závislost rovnovážné koncentrace sorbenda na tlaku při konstantní teplotě

Úroveň navlhání popisují dvě veličiny - vlhkost a navlhavost. Vlhkost materiálu ψ (-) je určena množstvím vody obsažené v jednotce objemu látky za daných vnějších podmínek, stanovuje se vztahem

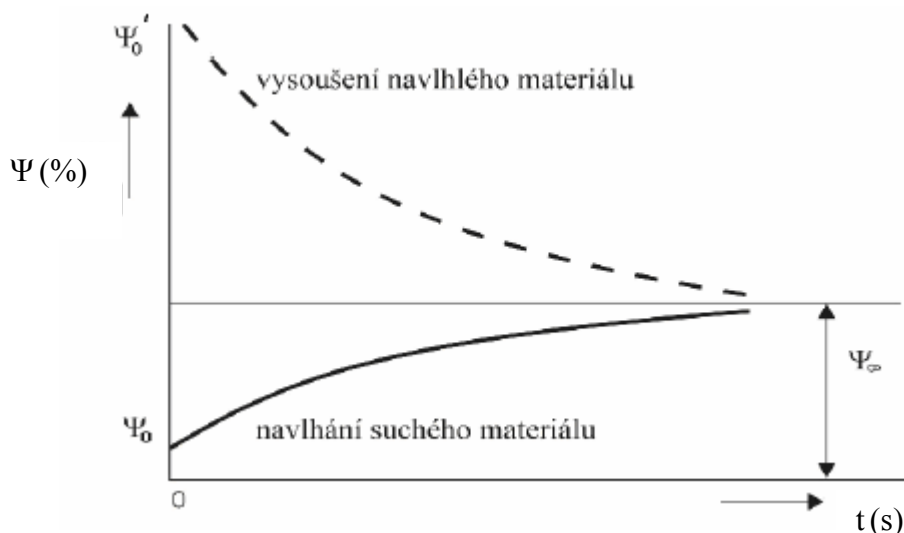
$$\psi = \frac{m - m_0}{m_0} 100 (\%) \quad (28)$$

kde m (g) je hmotnost navlhle látky a m_0 (g) hmotnost dokonale vysušené látky. Navlhavost (hygroskopičnost) φ' (%) je definována přírůstkem hmotnosti vody obsažené v jednotce objemu látky, při působení prostředí o 100% relativní vlhkosti, platí

$$\varphi' = \frac{m' - m_0}{m_0} 100 (\%) \quad (29)$$

kde m' (g) je hmotnost látky vystavené působení prostředí o 100% relativní vlhkosti.

Proces navlhání je proces dlouhodobý, což je patrné z Obr. 9. Původní úroveň vlhkosti při navlhání a vysoušení se asymptoticky blíží hodnotě ψ_∞ , která odpovídá dané vlhkosti prostředí. Při navlhání se hodnota vlhkosti postupně zvyšuje, při vysoušení daného materiálu klesá z původní hodnoty ψ'_0 na úroveň hodnoty ψ_∞ [2]



Obr. 9 Navlhání a vysoušení materiálu při dané vlhkosti a čase

2.3.3 Hygrostaty

Hygrostaty představují nejjednodušší zařízení, v nichž je udržována stálá relativní vlhkost vzduchu při stálé teplotě. Vlhkost vzduchu je upravována na takový stav, aby bylo možné vzduch použít jako zkušební prostředí pro různá měření při zkouškách odolnosti technických výrobků proti působení vysoké nebo naopak nízké vlhkosti. Metody vytváření relativní vlhkosti vzduchu jsou nezbytné pro experimentální práce v klimatotechnologii, ale i v řadě jiných oborů.

Zvyšování vlhkosti vzduchu

Definované stavy vzduchu je možno vytvořit pomocí vodných roztoků solí nebo kyselin. Technicky zajímavou je relativní vlhkost nad nasycenými roztoky solí, které obsahují dostatek soli v tuhé fázi. Vytváření konstantní relativní vlhkosti pomocí nenasycených roztoků je technicky velmi obtížné, neboť vypařováním vody z roztoku nebo naopak kondenzací vodní páry se mění koncentrace roztoku a tato změna je obtížně kontrolovatelná. U nasycených roztoků tato obtíž neexistuje, neboť případné změny v koncentraci roztoku jsou vyrovnány tím, že část rozpuštěné soli přejde v tuhou fázi nebo naopak část krystalů soli se rozpustí, nezmění-li se ovšem současně teplota soustavy pára – nasycený roztok.

Při vytváření konstantní relativní vlhkosti pomocí roztoků, ať už nasycených nebo nenasycených, nutno dbát na to, aby obě fáze, kapalná a plynná, byly v termodynamické rovnováze.

Snižování vlhkosti vzduchu

Pro snižování vodního obsahu (vysoušení) vzduchu je možno použít jednak tuhých, jednak kapalných hygroskopických látek. Tyto látky pohlcují vlhkost ze vzduchu až do stavu své hygroskopické rovnováhy. U tuhých hygroskopických látek je schopnost pohlcování umožněna především velkým povrchem látky, pohlcování vodní páry se děje mechanismem adsorpce a kapilární kondenzace. Při tomto procesu se uvolňuje teplo, které způsobuje zvyšování teploty vysušovaného vzduchu.

Množství vody, která může být ze vzduchu hygroskopickou látkou pohlcená, závisí na teplotě látky, relativní vlhkosti vzduchu a teplotě vzduchu.

V praxi se jako tuhé hygroskopické látky pro vysušování vzduchu využívá nejčastěji silikagel a aktivovaný oxid hlinitý. [2]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 *Vlastnosti měřeného vzorků (RELANEX)*

Materiál použitý na zkušební vzorky je vyroben z nekalcinovaného slídového papíru Remika a skleněné tkaniny, vzájemně spojených epoxy - novolakovou pryskyřicí. Relanex je za normální teploty ohebný, za tepla tvárný a lepivý, teplem tvrditelný elektroizolační materiál.

Technické údaje:

Vytvrzovací podmínky :

Vytvrzovací teplota: 130 – 180 °C

Čas vytvrzování: 0,5 – 8 hodin

Tlak: 2 – 3 Nmm²

Maximální hodnoty jsou dosaženy po 3 hodinách při 165 °C.

Použití :

Relanex se používá jako součást elektroizolačního systému vysokonapěťových elektrických strojů točivých, zejména motorů a generátorů, pracujících v podmínkách tepelné třídy F (155 °C) při provozním napětí do 24 kV.

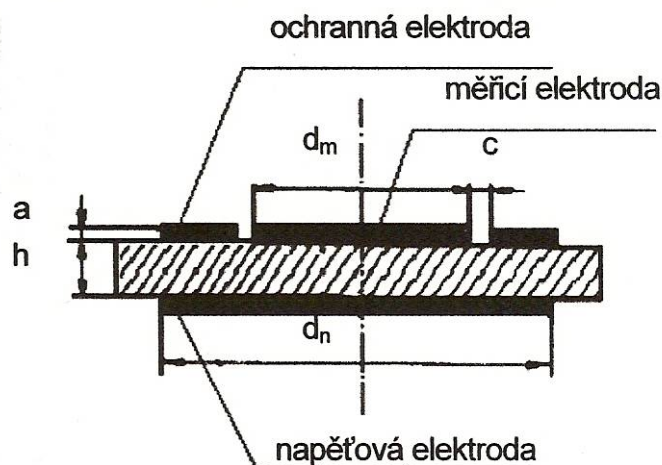
Skladovatelnost

6 měsíců při teplotě 20 °C

12 měsíců při teplotě 5 °C

3.2 *Měřicí zařízení*

Pro experiment byl použit tříelektrodový rovinný systém Agilent 16451B a LCR-metr HP 4284a firmy Hewlett Packard. LCR-metr má frekvenční rozsah 20 Hz - 10 MHz. Používá sběrnici HP-IB pro komunikaci s PC prostřednictvím PCI karty a obslužného softwaru. Výstupní data naměřených hodnot kapacity a ztrátového činitele se ukládají jako soubor v tabulkovém procesoru Microsoft Excel, ve kterém počítáme dále složky komplexní permitivity.



Obr. 10 Třielektrodotový systém

3.3 Příprava vzorku

Pro experiment byly použity vzorky, vytvořené při zpracování bakalářských a diplomových pracích v předchozích letech, o rozměrech 100 mm x 100 mm s průměrnou tloušťkou 0,144 mm. Vzorky byly stárnuty v horkovzdušné peci při teplotě 200 °C s různou dobou stárnutí: 100 h, 300 h, 500 h, 1000 h, 2150 h, 3000 h a 4070 hodin. Měření probíhalo při relativních vlhkostech 0 %, 33 %, 75 % a 95 %.

Před měřením byly vzorky vysušeny pomocí molekulového síta v exsikátoru při relativní vlhkosti 10 %, pro měření ve vlhkostech 33 %, 75 %, 95 % vzorky byly umístěny do exsikátorů, ve kterých byly namychány roztoky solí; zaleželo na tom, jakou vlhkost chceme dosáhnout v exsikátoru, podle toho byla použita sůl. Při každé nastavené relativní vlhkosti byl vzorek ponechán v exsikátoru po dobu 15 dní.

Tab. 1 Definovaná vlhkost roztoků soli

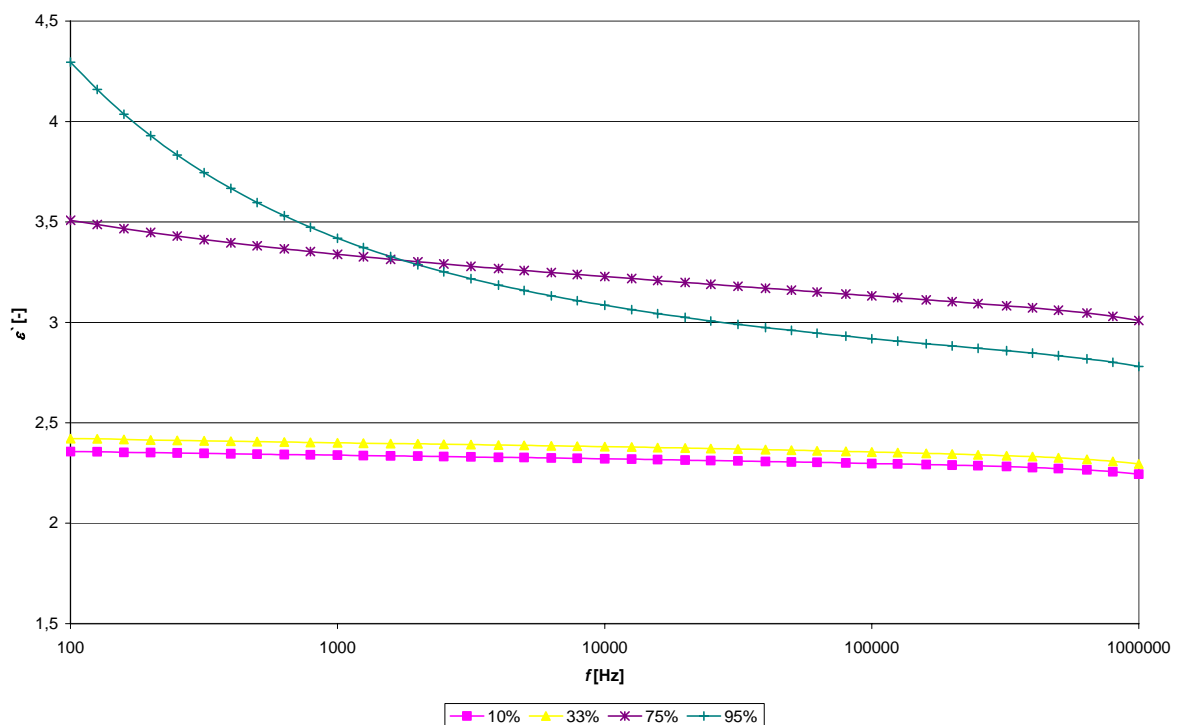
Roztok	Definovaná vlhkost (%)
LiCl₃	11,3
MgCl₂	32,8
K₂Cl₃	43,2
NaBr	57,4
NaCl	75,3
KCl	84,3
K₂SO₄	97,3

3.4 Průběh měření

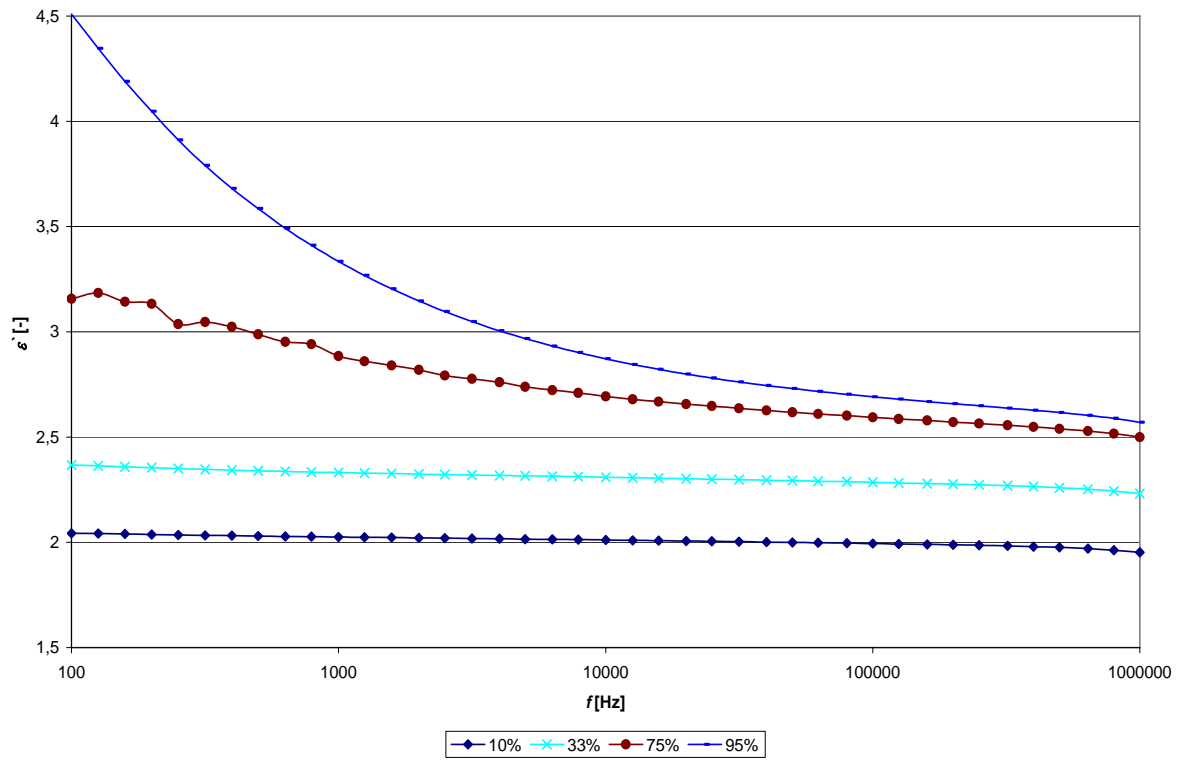
Pro měření byl nastaven frekvenční rozsah na LCR-metru HP 4284a Hewlett Packard 100 Hz – 1 MHz. Výstupní data naměřených kapacity a ztrátového činitele se ukládají jako soubor v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Pro měření byl použit tříelektrodový systém Agilent 16451B. Měřicí elektroda má průměr $d_m = 38$ mm a šířka mezery mezi ochrannou elektrodou a měřicí elektrodou je $c = 0,2$ mm. Každý vzorek byl měřen 10 krát. Pak pomocí Microsoft Excel bylo z naměřených hodnot kapacity a ztrátového činitele vypočítána relativní permitivita a ztrátové číslo. Tříelektrodový systém Agilent 16451B byl během měření umístěn ve vlhkostní komoře, na které se nastavovala potřebná vlhkost pro měření. Všechna měření byla provedena při teplotě 23 °C. Elektrodotový systém Agilent 16451B se připojuje čtyřvodičovým vedením, jeho konektory nesou označení H_c , H_p , L_c a L_p . Vypočtené hodnoty permitivity a ztrátového čísla byly vyneseny do grafických závislostí.

3.5 Grafické závislosti

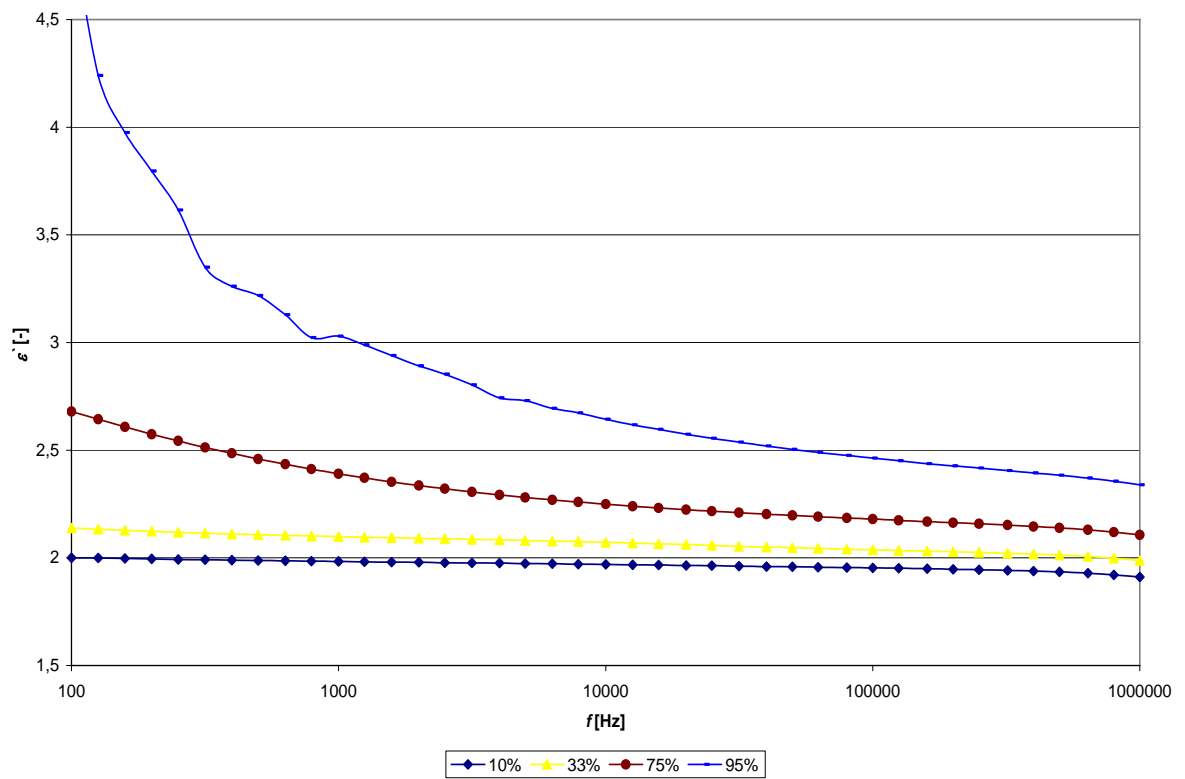
Vliv relativní vlhkosti na frekvenční závislosti permitivity



Obr. 11 Závislost permitivity na frekvenci vybraného vzorku (100 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti

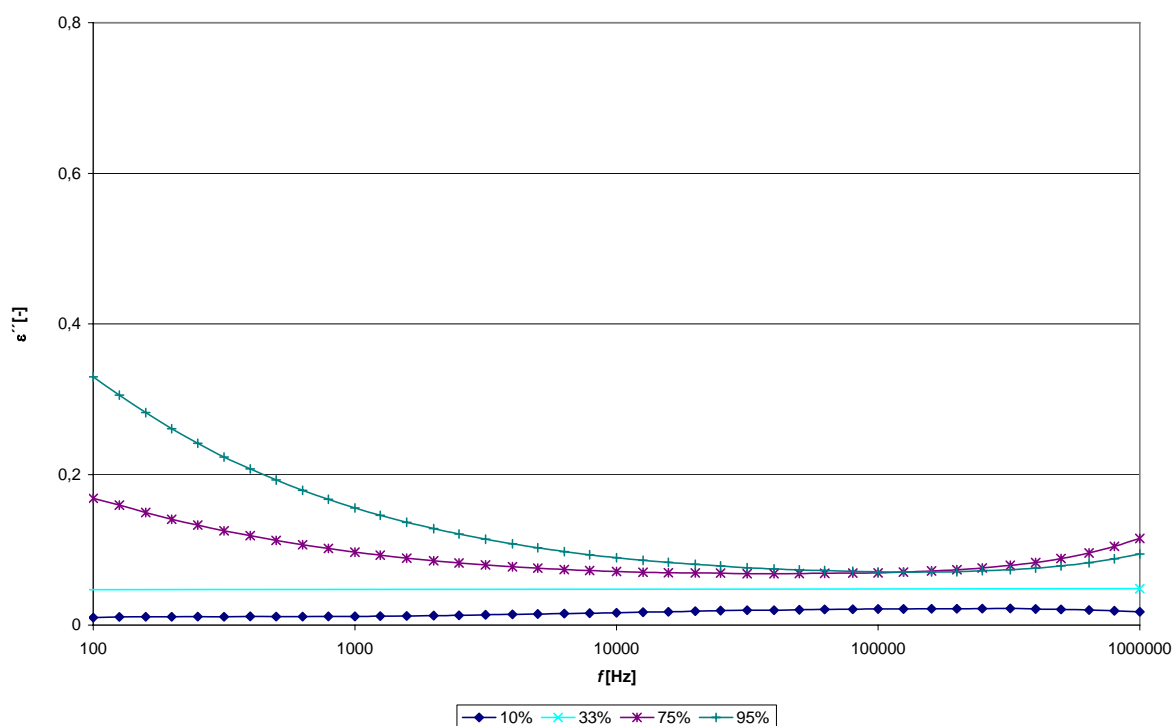


Obr. 12 Závislost permitivity na frekvenci vybraného vzorku (500 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti

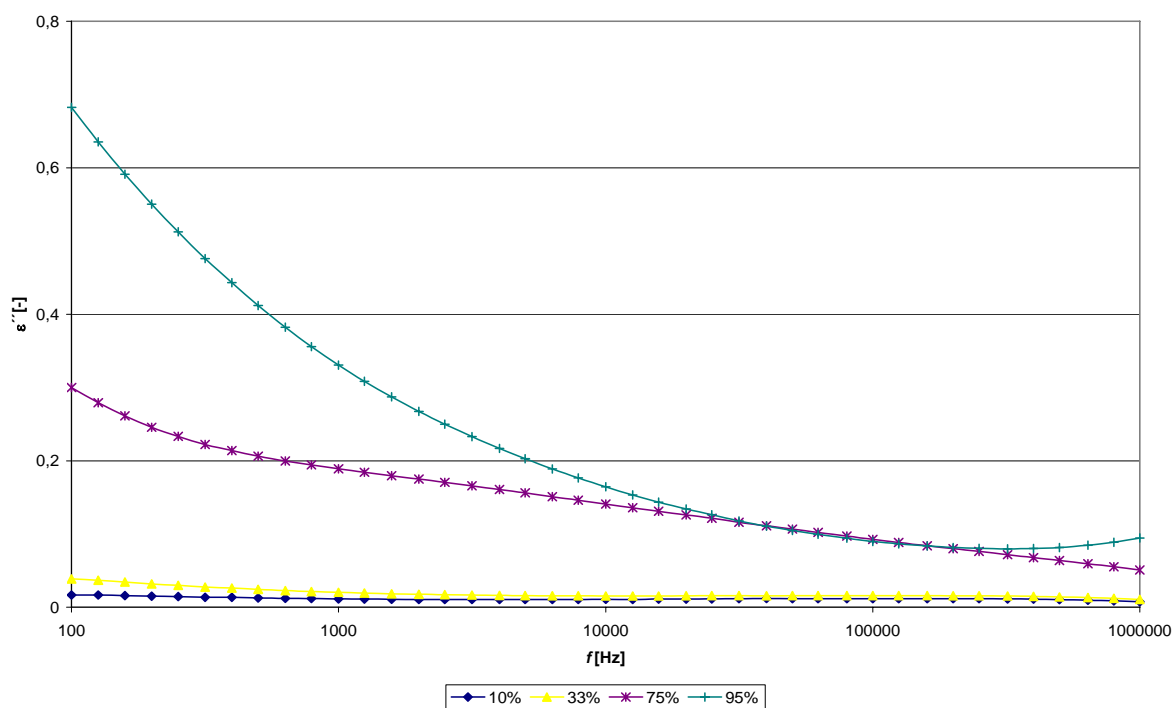


Obr. 13 Závislost permitivity na frekvenci vybraného vzorku (1000 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti

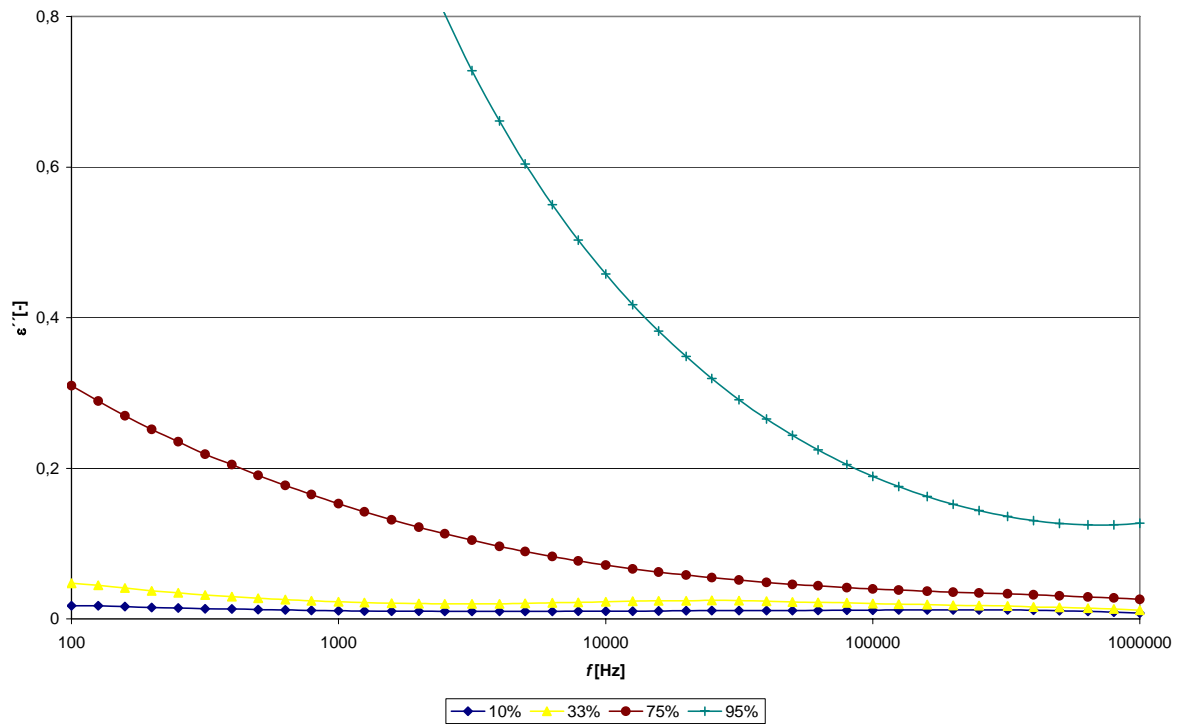
Vliv relativní vlhkosti na frekvenční závislosti ztrátového čísla



Obr. 14 Závislost ztrátového čísla na frekvenci vybraného vzorku (100 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti

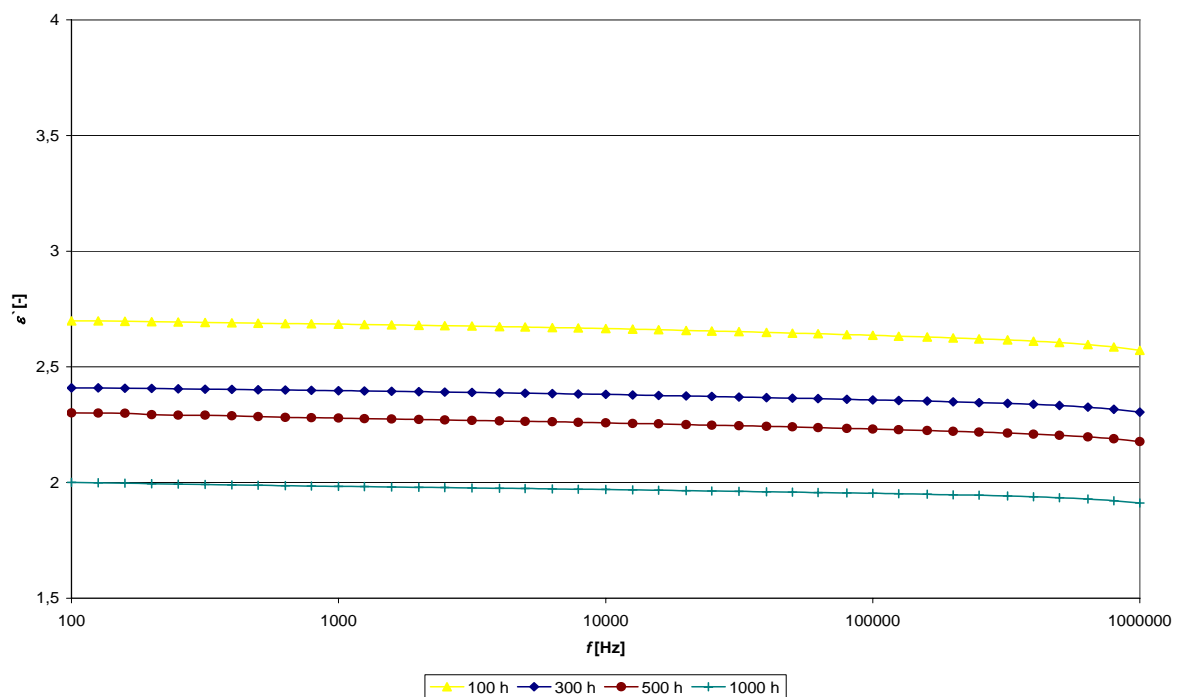


Obr. 15 Závislost ztrátového čísla na frekvenci vybraného vzorku (500 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti

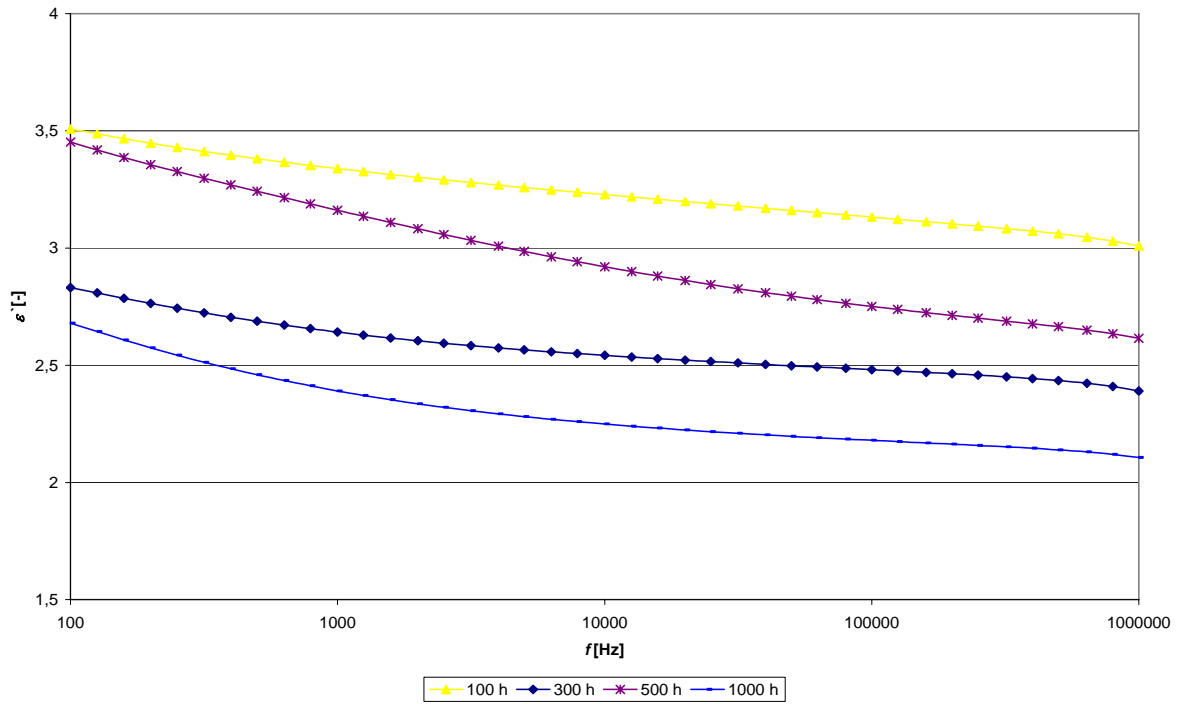


Obr. 16 Závislost ztrátového čísla na frekvenci vybraného vzorku (1000 hodin stárnutí) pro různé vlhkosti

Vliv doby stárnutí na frekvenční závislosti permitivity s konstantní relativní vlhkostí

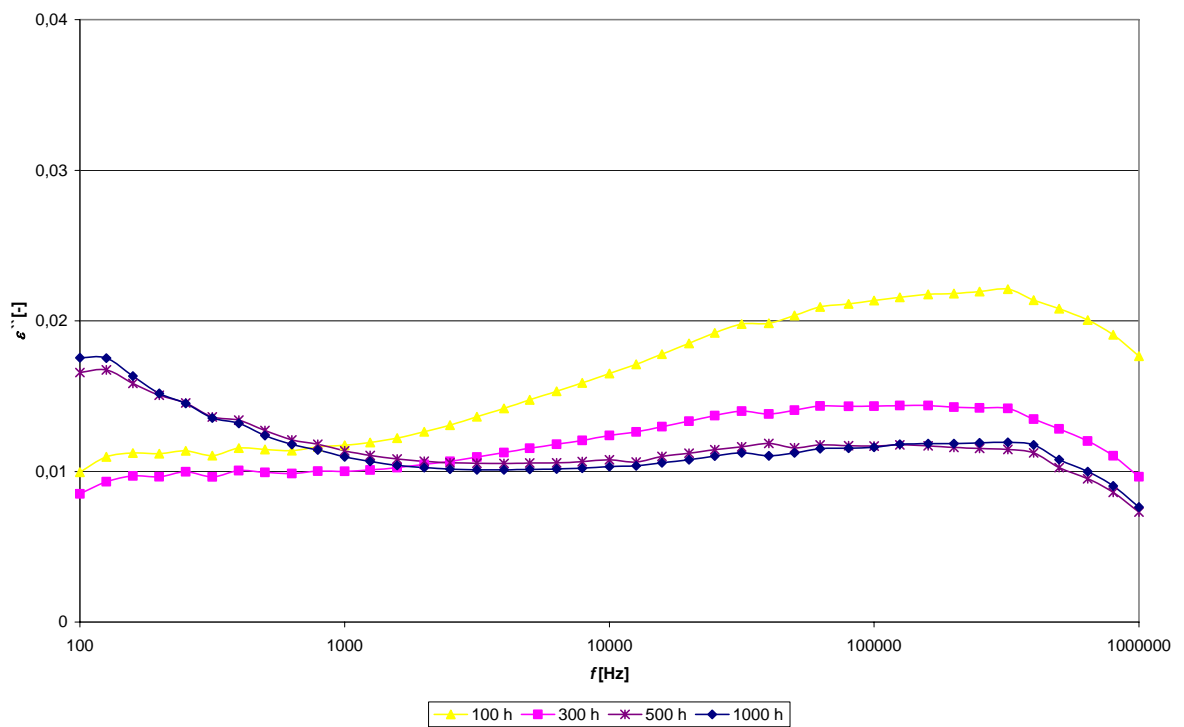


Obr. 17 Frekvenční závislost permitivity s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 10 %

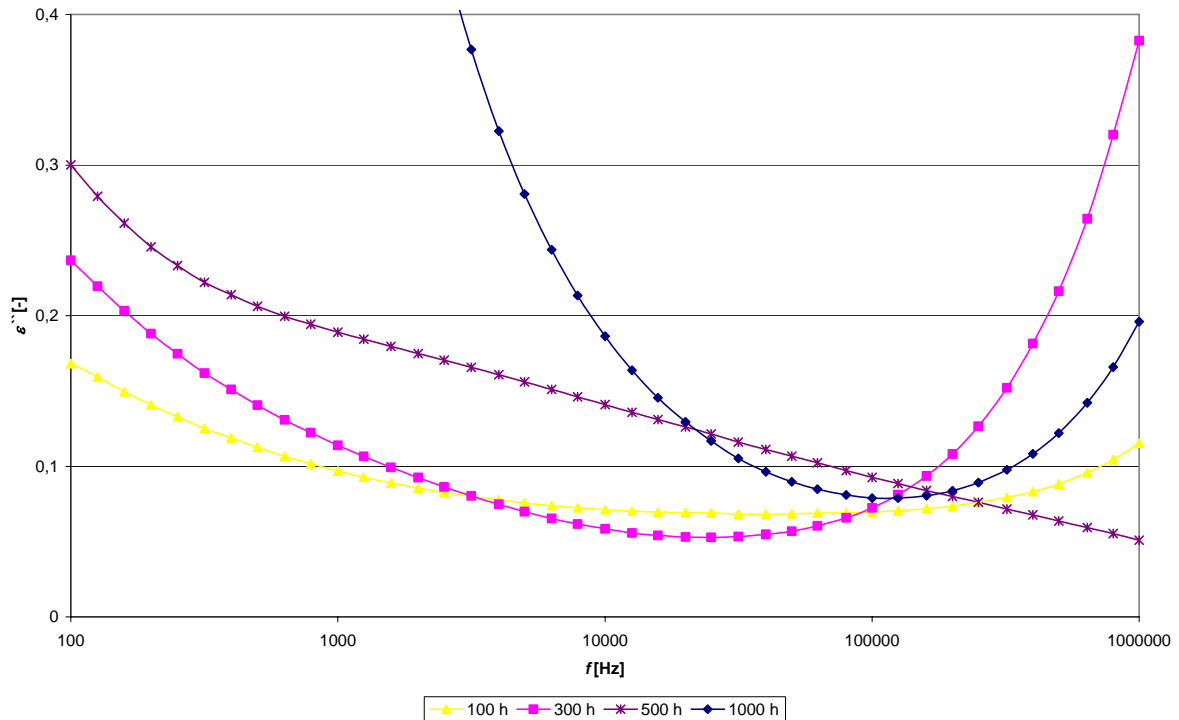


Obr. 18 Frekvenční závislost permitivity s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 75 %

Vliv doby stárnutí na frekvenční závislosti ztrátového čísla s konstantní relativní vlhkostí



Obr. 19 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 10 %



Obr. 20 Frekvenční závislost ztrátového čísla s parametrem doby stárnutí při relativní vlhkosti 75 %

3.6 *Vyhodnocení výsledků měření*

Z výsledků měření zpracovaných formou frekvenčních závislostí složek komplexní permitivity vyplývá, že se vzrůstající dobou stárnutí a relativní vlhkostí prostředí se zvyšuje ztrátové číslo (Obr. 11, Obr. 12, Obr. 13) Stejný trend vykazuje vliv doby stárnutí a relativní vlhkosti na relativní permitivitu. (Obr. 14, Obr. 15, Obr. 16)

Pro získané komplexní informace o použitém materiálu s ohledem na možnosti využití v elektroizolačních systémech by bylo potřeba sledovat ještě vliv teploty stárnutí na vlastnosti Relanexu.

Obrázky (Obr. 17, Obr. 18, Obr. 19, Obr. 20), které zobrazují frekvenční závislosti ϵ' , ϵ'' , s parametrem doby stárnutí, při konstantní relativní vlhkosti prostředí, potvrzují shrnutí předchozích výsledků, že s vzrůstající dobou stárnutí a relativní vlhkostí prostředí se zvyšuje ztrátové číslo a permitivita. Především zvyšování ztrát v elektroizolačním materiálu je jev nežádoucí.

4 Závěr

Bakalářská práce se zabývá pozorováním dielektrických vlastností materiálu Relanex v závislosti na vlhkosti a době stárnutí. K měření byly použity vzorky stárnuté při teplotě 200 °C s dobou stárnutí 100 h, 300 h, 500 h, 1000 h, 2150 h, 3000 h, 4070 hodin. Na všech vzorcích byly proměřeny hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele v frekvenčním rozsahu 100 Hz – 1 MHz. Veškerá měření probíhala při $\nu = 23$ °C. V průběhu experimentu byl sledován vliv navlhnutí vzorků na hodnoty složek komplexní permittivity.

Práce je rozdělená na dvě základní části. V teoretické části jsou popsány základní dielektrické vlastnosti, dielektrická relaxační spektroskopie a navlhání látek. Experimentální část obsahuje samotný popis zkoumaného materiálu, metodiku měření a popis měřicího zařízení. Součástí práce jsou výsledky vyhodnocené formou grafických závislostí.

Během experimentu byl proveden rozsáhlý soubor měření. Z důvodu větší přehlednosti práce jsou zde uvedeny pouze vybrané grafické závislosti. Veškerá experimentálně získaná data včetně tabulek zahrnujících i údaje o rozměrech vzorků jsou vloženy na CD-rom.

Přes drobné nesrovnalosti v experimentálně získaných výsledcích vykazuje předložený materiál Relanex poměrně malé ztráty a dobré elektroizolační schopnosti především v oblasti nižších relativních vlhkostí prostředí.

5 Použitá literatura

- [1] Liedermann, K.: Materiály a technická dokumentace. Interní učební texty. FEKT VUT Brno, 2004.
- [2] Kocman , V.: Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů – Izolanty A. Skriptum VUT Brno. SNTL Praha, 1971.
- [3] Havlíček, S., Kazelle, J.: Materiály a technologie - Laboratorní cvičení. Skriptum VUT Brno, 1990.
- [4] Liedermann, K.: Klimatotechnologie. Interní učební texty. FEKT VUT Brno, 2006.
- [5] Mentlík.V.: Dielektrické prvky a systémy. BEN. Praha 2006.