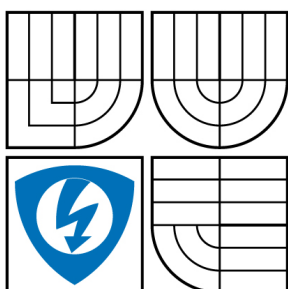


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TEPELNĚ NAMÁHANÝCH DRÁŽKOVÝCH IZOLACÍ

DIELECTRIC PROPERTIES OF THERMALLY AGED SLOT INSULATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

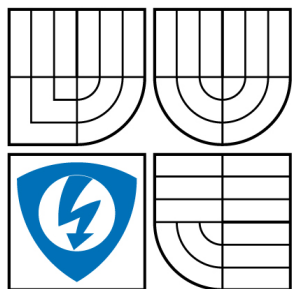
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ PŘIKRYL

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: Přikryl Tomáš

ID: 84170

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Dielektrické vlastnosti tepelně namáhaných drážkových izolací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s teorií dielektrické absorpce látek relaxačního typu a s metodami měření časových průběhů dielektrické absorpce.

Experimentálně proveďte časové průběhy dielektrické absorpce u vzorků předložené drážkové izolace na bázi polyesterové fólie. Měření realizujte na vzorcích v dodaném stavu a po dlouhodobém tepelném namáhání. Teplotu stárnutí navrhnete s přihlédnutím k platné normě ČSN.

Metodiku experimentu přizpůsobte dosavadním zkušenostem a přístrojovému vybavení ústavu elektrotechnologie.

Výsledky měření na nestárnutých i stárnutých vzorcích porovnejte z hlediska životnosti dané drážkové izolace při použití v technické praxi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

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.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Tomáš Přikryl

Bytem:

Narozen/a (datum a místo): 18.12.1984, Boskovice

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Ing. Edita Hejátková

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

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

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Dielektrické vlastnosti tepelně namáhaných drážkových izolací

Vedoucí/školicel VŠKP: Ing. Zdenka Rozsivalová

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt:

Bakalářská práce sleduje změny základních dielektrických vlastností drážkové izolace na bázi polyesterové fólie v průběhu změny vlhkosti. Na vzorcích materiálu byly měřeny časové závislosti nabíjecích inab a vybíjecích ivyb proudů, při vlhkostech 0 %, 33 %, 75 %, 95 % a teplotě okolí. Dále je v práci sledována časová závislost vnitřní rezistivity v závislosti na době stárnutí a relativní vlhkosti prostředí. Předmětem experimentů je materiál ISONOM NKN 2039 firmy ISOVOLTA Elektroisolierstaffe.

Abstract:

Bachelor's thesis monitor changes in the basic properties of dielectric isolation on the basis of polyester film during the humidity changes. The samples of material were measured time according rechargeable inab and dischargable ivyb currents in humidities 0 %, 33 %, 75 %, 95 % and ambient temperature. Further work is monitored by the time dependence of internal rezistivity depending on the time of ageing and relative humidity. The subject of experiments is material ISONOM NKN 2039 companie ISOVOLTA Elektroisolierstaffe.

Klíčová slova:

Drážková izolace, Polyesterová fólie, Nabíjecí proudy, Vybíjecí proudy, Vlhkost.

Keywords:

Slot isolation, Polyester film, Charging currents, Discharging currents, Humidity.

Bibliografická citace díla:

PŘIKRYL, T. *Dielektrické vlastnosti tepelně namáhaných drážkových izolací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 45 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsívalová.

Prohlášení autora o původnosti díla:

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

V Brně dne 29. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Zdence Rozsíválové za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

OBSAH

ÚVOD	11
2 TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1 VLASTNOSTI DIELEKTRIK	12
2.1.1 Charakteristika dielektrik.....	12
2.1.2 Dielektrická polarizace	12
2.1.3 Komplexní permitivita a dielektrické ztráty	16
2.2 DIELEKTRICKÁ PEVNOST	21
2.3 DIELEKTRICKÁ ABSORBCE	22
2.3.1 Nabíjecí charakteristika	23
2.3.2 Vybíjecí charakteristika.....	24
2.4 VLHKOST A NAVLHAVOST MATERIÁLU	24
2.4.1 Vlhkost vzduchu.....	24
2.4.2 Navlhavost (hygroskopičnost)	26
2.4.3 Zvyšování vlhkosti vzduchu	28
3 EXPERIMENT	30
3.1 VLASTNOSTI MĚŘENÝCH VZORKŮ	30
3.2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	31
3.3 PŘÍPRAVA VZORKU	33
3.4 POSTUP MĚŘENÍ	34
3.5 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI, VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	35
4 ZÁVĚR	44
5 POUŽITÁ LITERATURA	45

Seznam obrázků

Obr. 1: Vektorový diagram elektrické indukce, intenzity elektrického pole a komplexní permitivity	17
Obr. 2: Průběh složek ε' a ε'' komplexní permitivity v závislosti na kruhovém kmitočtu ω (dielektrická disperze).....	19
Obr. 3: Coleho-Coleho diagram klasického Debyeho průběhu $\varepsilon^* = f(\omega)$ při $\mathcal{G} = \text{konst.}$	20
Obr. 4: Coleho-Coleho kruhový diagram při distribuci relaxačních dob.....	21
Obr. 5: Časový průběh proudu tekoucího dielektrikem po připojení (2.3.1) a po odpojení (2.3.2) stejnosměrného elektrického pole	23
Obr. 6: Závislost rovnovážné koncentrace sorbenda na tlaku při konstantní teplotě.....	27
Obr. 7: Navlhání a vysoušení materiálu při dané vlhkosti a čase	28
Obr. 8: Elektrometr Keithley 6517A.....	31
Obr. 9: Zapojení měřicího pracoviště.....	33
Obr. 10: Měřicí pracoviště s přípravkem pro zvyšování vlhkosti.....	34
Obr. 11: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u nestárnutého vzorku.....	35
Obr. 12: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (250 h, 220 °C).....	35
Obr. 13: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (500 h, 220 °C).....	36
Obr. 14: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (1000, h 220 °C).....	36
Obr. 15: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (1000 h, 200 °C).....	37
Obr. 16: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů vzorku při 10% relativní vlhkosti na době stárnutí.....	38
Obr. 17: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů vzorku při 33% relativní vlhkosti na době stárnutí.....	38
Obr. 18: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů vzorku při 75% relativní vlhkosti na době stárnutí.....	39
Obr. 19: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u nestárnutého vzorku	40

Obr. 20: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (250 h 220 °C)	40
Obr. 21: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (500 h 220 °C)	41
Obr. 22: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (1000 h 220 °C)	41
Obr. 23: Závislost rezistivity vzorku při 10% relativní vlhkosti na době stárnutí	42
Obr. 24: Závislost rezistivity vzorku při 75% relativní vlhkosti na době stárnutí	42

Seznam tabulek

Tab. 1: Dielektrická pevnost vybraných látek.....	22
Tab. 2: Definovaná vlhkost roztoků solí	29
Tab. 3: Vlastností Kaptonu.....	31
Tab. 4: Parametry elektrometru Keithley 6517A	32

Úvod

Bakalářská práce se zabývá problematikou drážkové izolace na bázi polyesterové fólie. Při experimentálních pracích byly využity vzorky vytvořené při zpracování bakalářských a diplomových prací v předchozích letech. Experiment byl zaměřen na sledování vlastností izolace v závislosti na stavu stárnutí a navlhnutí materiálu.

2 Teoretická část

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 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 $\varepsilon'(-)$
- ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta(-)$
- vnitřní rezistivita $\rho_v (\Omega\text{m})$
- povrchová rezistivita $\rho_p (\Omega)$
- elektrická pevnost $E_P (\text{Vm}^{-1})$

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

Polarizace 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 (natáčí) se do směru pole. Za určitých podmínek jsou i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace. Mírou polarizace v látce je vektor polarizace $\vec{P}$ a relativní permitivita ε' .

S procesem polarizace souvisí relativní permitivita dielektrika ε' a ztrátový činitel $\tan \delta$, 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 $\tan \delta$ za různých podmínek základním kritériem při volbě materiálu pro jakékoliv 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 , orientovaných ve směru působení elektrického pole. Polarizace $\vec{P}$ je v určitém místě rovna dipólovému momentu vztaženému na jednotku objemu.

Druhy polarizací dielektrik

A. Polarizace rychlé (pružné)

- Polarizace elektronová
- Polarizace iontová

B. Polarizace pomalé (relaxační)

- Polarizace dipólová
- Polarizace iontová

C. Polarizace zvláštní

- Polarizace mezivrstevová
- Polarizace samovolná
- Polarizace trvalá
- Polarizace rezonanční

Pružné polarizace

Pružné polarizace jsou jevy s rychlým průběhem, zvané také rychlé polarizace. Spočívají v posuvu 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, 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 natáčí 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 τ (s), nazývanou též relaxační dobou.

Pomalé polarizace značně závisí na teplotě i 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, které způsobují 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 dipólové polarizace u látek nízkomolekulárních jsou 10^{-12} - 10^{-8} s, u makromolekulárních látek mohou dosahovat hodnot o mnoho řádů vyšších.

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

Polarizace samovolná se vyskytuje v látkách feroelektrických, které se vyznačují výjimečně velkou relativní permitivitou, řádově až 10^4 . Spontánní polarizace je podmíněna existencí doménové struktury těchto dielektrik.

Polarizace rezonanční vzniká následkem rezonance vlastních (tepelných) oscilací některých částic v látce (elektronů a iontů) s kmity vnějšího elektrického pole. Protože se vyskytuje až při velmi vysokých kmitočtech (v optickém spektru), s nimiž se v elektrotechnice obvykle nepracuje, je z hlediska běžné průmyslové praxe málo zajímavá.

2.1.3 Komplexní permitivita a dielektrické ztráty

Působí – li na dielektrikum časově proměnné elektrické pole, jehož intenzita $\vec{E}(t)$ má časový průběh

$$\vec{E}(t) = \vec{E} \cos \omega t, \quad (2)$$

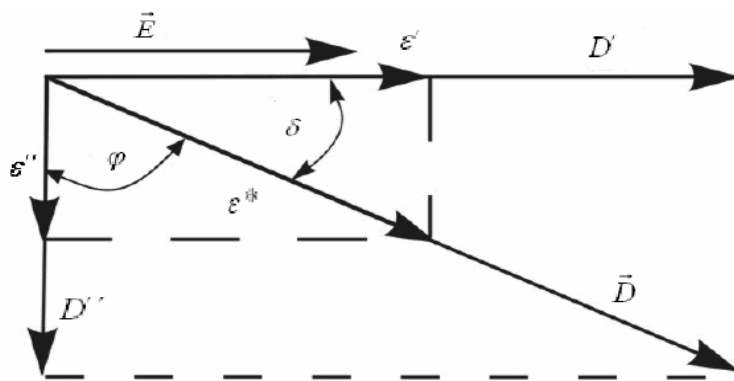
kde $\vec{E}$ (Vm^{-1}) je amplituda intenzity elektrického pole a $\omega = 2\pi f$ (s^{-1}) kruhový kmitočet, projeví se dynamické vlastnosti dielektrika.

Elektrická indukce $\vec{D}(t)$ (Cm^{-2}) je rovněž periodickou funkcí času se stejným kmitočtem.

Závislost mezi $\vec{D}$ a $\vec{E}$ vyjadřuje rovnice

$$\vec{D} = \varepsilon(\omega) \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (3)$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$) a $\varepsilon(\omega) = \varepsilon^*$ je komplexní permitivita.



Obr. 1: Vektorový diagram elektrické indukce, intenzity elektrického pole a komplexní permitivity

Z diagramu podle Obr. 1 vyplývají tyto vztahy

$$\varepsilon' = \varepsilon^* \cos \delta, \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon^* \sin \delta, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (6)$$

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 opoždí za vektorem intenzity $\vec{E}(t)$. Proto není $\vec{D}(t)$ ve fázi s $\vec{E}(t)$, nýbrž mezi amplitudami $\vec{D}(t)$ a $\vec{E}(t)$ 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

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon'(\omega) \rightarrow \varepsilon_s \text{ je statická relativní permitivita} \quad (7)$$

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

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

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon''(\omega) \rightarrow 0 \quad (8)$$

Komplexní permitivita je vyjádřena vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (9)$$

Debye odvodil pro komplexní permitivitu vztah

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (10)$$

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

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (11)$$

Pro složky ε' a ε'' platí

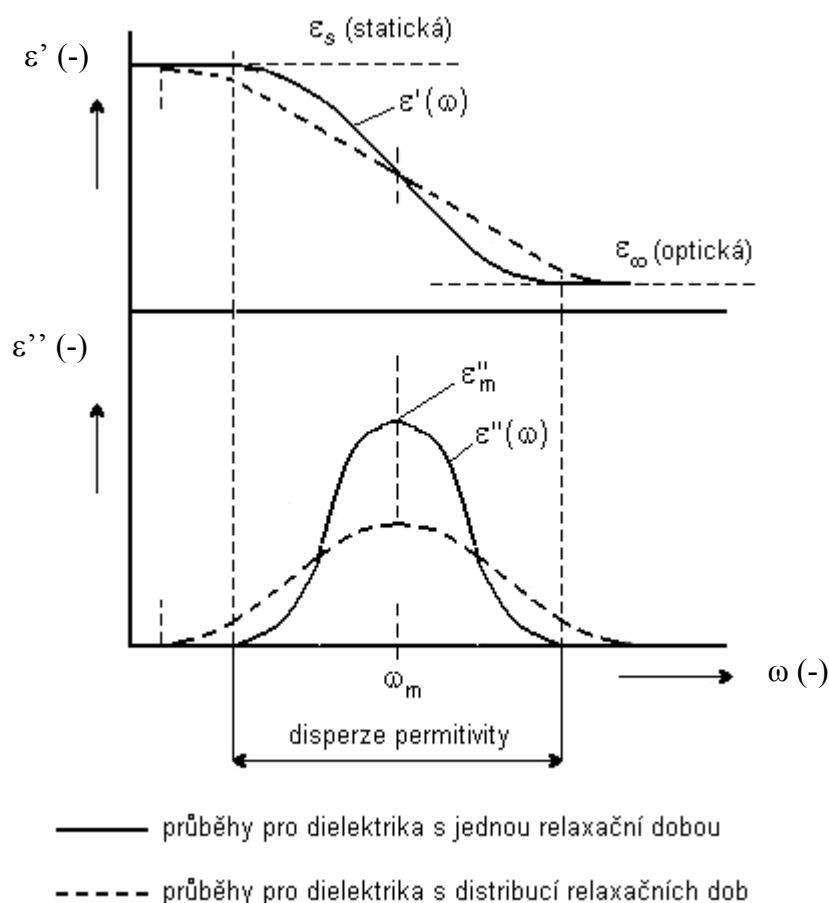
$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (12)$$

Ztrátový činitel je

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2} \quad (13)$$

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 nejpráhřejšího 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 kondenzátor. 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)

Z úpravy rovnic (12) a (13) vyplývá vztah pro ε''

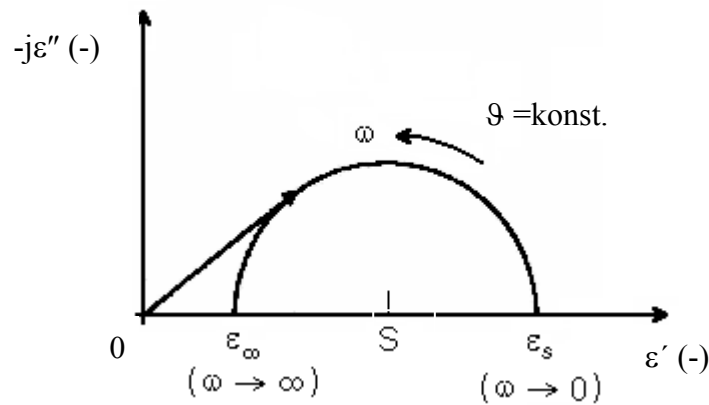
$$\varepsilon''^2 = (\varepsilon' - \varepsilon_\infty)(\varepsilon_s - \varepsilon'), \quad (14)$$

Úpravou (14) lze získat rovnici kružnice

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}\right)^2, \quad (15)$$

jejíž střed (S) má souřadnice středu $\left[\frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} ; 0\right]$ a poloměr $R = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}$.

Grafickým znázorněním rovnice (14) 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 ϑ .



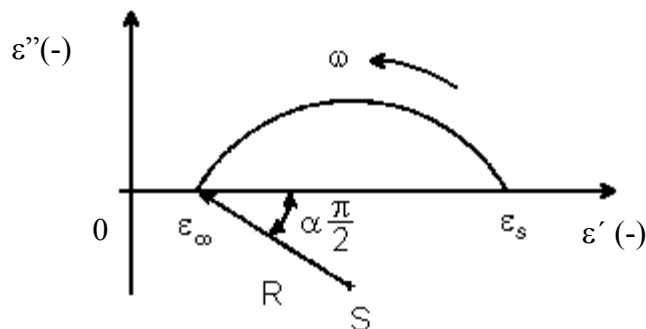
Obr. 3: Coleho-Coleho diagram klasického Debyeho průběhu $\varepsilon^* = f(\omega)$ při $\vartheta = \text{konst.}$

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 Debyeho rovnice ve tvaru (16). Tato rovnice pak odpovídá Coleho-Coleho kruhovému diagramu z Obr. 4 se středem pod osou ε' .

Tento případ popisuje rovnice

$$\varepsilon^* = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}}, \quad (16)$$

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



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

2.2 Dielektrická pevnost

Dielektrická pevnost je fyzikální pojem vyjadřující odolnost materiálů vůči elektrickému poli. Používá se v následujících významech:

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

Průrazná intenzita elektrického pole

Teoreticky je dielektrická pevnost materiálu jeho charakteristickou vlastností která nezávisí na uspořádání elektrod ani na tom, z jakého materiálu jsou vyrobeny. Působením elektrického pole se při průrazu uvolňují vázané elektrony. Je-li přiložené pole dost vysoké, může urychlit elektrony natolik, že při jejich srážkách s neutrálními atomy nebo molekulami jsou uvolňovány další elektrony; tento jev se nazývá *lavinovitý průraz*. K průrazu dochází velmi rychle (typicky během nanosekund) a vzniká při něm elektricky vodivá dráha skrz materiál izolantu. Jedná-li se o pevnou látku, průraz podstatně zhorší nebo materiál zcela ztratí izolační schopnosti.

Průrazné napětí

Napětí, při němž dojde k průrazu v daném případě, závisí na vzájemném uspořádání dielektrika (izolátoru) a elektrod, na které je přiloženo elektrické pole, dále na časovém

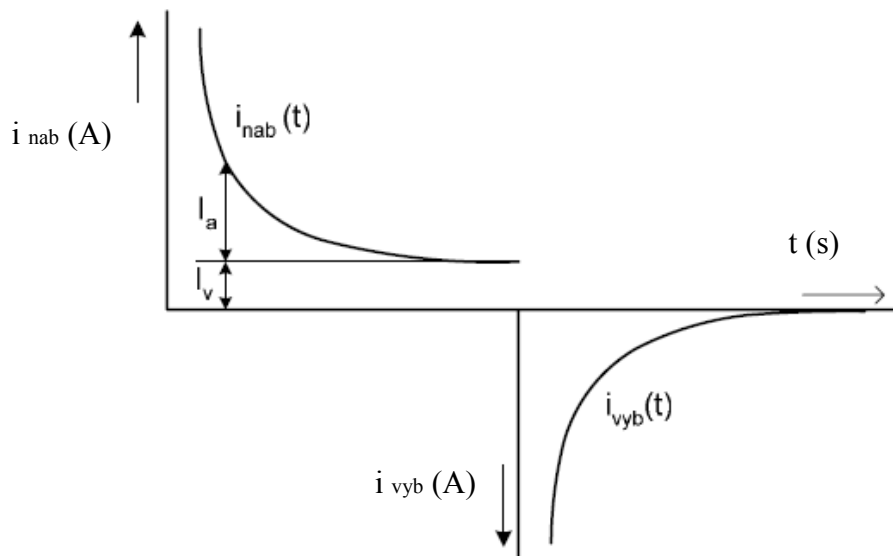
průběhu (rychlosti růstu) napětí na elektrodách. Protože dielektrikum vždy obsahuje mikroskopické defekty, jeho dielektrická pevnost je daleko nižší než teoretická hodnota v ideálním materiálu. Dielektrická pevnost tenkých vrstev bývá vyšší než v případě silnějších destiček téhož materiálu. V aplikacích, kde se vyžaduje co nejvyšší dielektrická pevnost, např. pro vysokonapěťové kondenzátory nebo pulzní transformátory, se proto používají vícenásobné tenké vrstvy dielektrik. [7]

Tab. 1: Dielektrická pevnost vybraných látek

Dielektrická pevnost vybraných látek	
Látka	Dielektrická pevnost (MV/m)
vzduch	3
křemen	8
titanát stroncia	8
neoprénová pryž	12
nylon	14
sklo Pyrex	14
silikonový olej	15
papír	16
bakelit	24
polystyren	24
teflon	60

2.3 Dielektrická absorpce

Jev dielektrické absorpce vyjadřuje složité nestacionární procesy, které probíhají v reálném dielektriku kondenzátoru po jeho připojení na zdroj stejnosměrného napětí. Absorpce se projevuje tím, že kondenzátor se nenabije okamžitě, nýbrž pozvolna, s určitým zpožděním. Podobně pozvolna se bude kondenzátor i vybíjet. Z Obr. 5 je zřejmé, že nabíjecí i vybíjecí proudy mají v prvním přiblížení exponenciální průběh. Ve skutečnosti se však mění s časem pomaleji než odpovídá časové konstantě určené výpočtem.



Obr. 5: Časový průběh proudu tekoucího dielektrikem po připojení (2.3.1) a po odpojení (2.3.2) stejnosměrného elektrického pole

2.3.1 Nabíjecí charakteristika

Proud i_{nab} (A) znázorněný na Obr. 5 je nabíjecí proud, jehož počáteční velikost je dána omezujícím odporem zdroje, přívodů a velikostí napětí U (V). Po nabití geometrické kapacity i_{nab} exponenciálně klesá s časovou konstantou $\tau_0 = R_0 C$, kde C je kapacita kondenzátoru a nabíjecí proud i_{nab} zaniká. Proud i_d je dobíjecí proud, který protéká po doznění nabíjecího proudu i_{nab} . Pro i_d platí vztah

$$i_d(t) = i_a(t) + i_v, \quad (17)$$

kde $i_a(t)$ absorpční proud, časově proměnný, rovný součtu proudů polarizačních, vyvolaných rozvojem relaxačních polarizací, i_v (A) je vodivostní proud.

Časová závislost absorpčního proudu je v prvním případě exponenciálního charakteru a vyjadřuje se obvykle Maxwellovým vztahem, který platí pro jeden relaxační proces:

$$i_a(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (18)$$

kde A (s) je materiálová konstanta, τ (s) je relaxační doba

V případě existence více relaxačních procesů je potřeba počítat se sumací vztahu (18). Při vyšším počtu procesů se často sumace nahrazuje známou Curieho funkcí ve tvaru

$$i = C t^{-n} \quad (19)$$

kde C (s) je materiálová konstanta, t (s) je čas

2.3.2 Vybíjecí charakteristika

Proud i_{vyb} (A) je vybíjecí proud, který velmi rychle odezní, když byl v čase t_v zdroj napětí odpojen a elektrody kondenzátoru zkratovány. Proud i_r (A) je resorpční proud, časově proměnný, který dielektrikem protéká po odeznění vybíjecího proudu i_{vyb} následkem zániku jevů vyvolaných relaxačními polarizacemi. I když jde o vybíjení téhož náboje, který předtím dielektrikum pojalo prostřednictvím absorpčního proudu, neplatí rovnost

$$i_r(t) \neq -i_a(t), \quad (20)$$

poněvadž kapacity se vybíjejí také jinými cestami než se nabíjely, přičemž část náboje se vyrovná svodovými cestami uvnitř dielektrika. [2]

2.4 Vlhkost a navlhavost materiálu

2.4.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost je základní vlastností vzduchu. Vlhkost vzduchu udává, jaké množství vody v plynném stavu (vodní páry) obsahuje dané množství suchého vzduchu. Množství vodní páry je časově velice proměnlivé a liší se také od místa k místu. Z pohledu meteorologie a klimatologie má množství vodních par zásadní význam, protože je od něho odvislé počasí a podnebí.

Charakteristiky vlhkosti

Pro vyjádření množství vodních par ve vzduchu slouží hned několik charakteristik: tlak vodní páry, absolutní vlhkost vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, rosný bod a měrná vlhkost vzduchu.

Tlak vodní páry (napětí vodní páry) je dílčí tlak vodní páry obsažené ve vzduchu; udává se v hektopascalech (hPa), dříve se udával v milibarech (mb) či torrech (torr). Sytostní doplněk je dán rozdílem maximálního tlaku vodní páry při dané teplotě a skutečným tlakem vodní páry při téže teplotě. Sytostní doplněk se dá také vyjádřit rozdílem maximálního směšovacího poměru či maximální měrné vlhkosti při dané teplotě a skutečného směšovacího poměru či měrné vlhkosti při téže teplotě.

Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu Φ (gcm^{-3}) (hustota vodní páry nebo) vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu. V meteorologii se vyjadřuje nejčastěji jako hmotnost vodní páry vztažené na jednotku objemu vzduchu. Je-li m (g) hmotnost vodní páry v daném objemu $V(\text{cm}^{-3})$, pak absolutní vlhkost vzduchu lze vyjádřit jako

$$\Phi = \frac{m}{V} \quad (21)$$

Relativní (poměrná) vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu $\varphi(\%)$ udává poměr mezi okamžitým množstvím vodní páry ve vzduchu a množstvím páry, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení. Relativní vlhkost se též někdy označuje jako poměrná vlhkost. Je-li m (g) hmotnost vodní páry, která je ve vzduchu obsažena, a M (g) hmotnost vodní páry, kterou by obsahoval stejný objem vzduchu, kdyby byl při stejné teplotě a tlaku vodními parami nasycen, pak lze relativní vlhkost vzduchu vyjádřit jako

$$\varphi = 100 \frac{m}{M} \quad (\%), \quad (22)$$

Tento vztah lze s pomocí výrazu pro absolutní vlhkost vzduchu přepsat ve tvaru

$$\varphi = 100 \frac{\Phi}{\Phi_n} \quad (\%), \quad (23)$$

kde Φn označuje absolutní vlhkost vzduchu nasyceného vodními parami. Vzhledem k tomu, že množství sytých par závisí především na teplotě vzduchu, mění se relativní vlhkost vzduchu s jeho teplotou i přesto, že absolutní množství vodních par zůstává stejné. Tato vlastnost má velký význam při vzniku oblaků a tím i tvorbě počasí.

Rosný bod

Rosný bod (teplota rosného bodu) je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami (relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %). Pokud teplota klesne pod tento bod, nastává kondenzace. Teplota rosného bodu je různá pro různé absolutní vlhkosti vzduchu. Čím více je vodní páry ve vzduchu, tím vyšší je teplota rosného bodu, čili tím vyšší teplotu musí vzduch (a pára) mít, aby pára nezkondenzovala. Naopak, pokud je ve vzduchu vodní páry jen velmi málo, může být vzduch chladnější, aniž pára zkondenzuje. Vzduch za určité teploty může obsahovat jen určité množství vodních par. Čím je teplota vzduchu (a tím i páry) vyšší, tím více páry může v jednotce objemu být, aniž začne pára kapalnět. Pokud se vzduch začne ochlazovat, vodní páry začnou kondenzovat. Přítomnost kondenzačních jader proces kondenzaci urychluje. Pokud nejsou kondenzační jádra přítomna, nemusí ke kondenzaci dlouho dojít, byť je vlhký vzduch podchlazen pod rosný bod. Rosný bod lze považovat za jiné vyjádření absolutní vlhkosti vzduchu.

Vlhkost vzduchu na Zemi

Běžně na Zemi najdeme místa, kde vodní pára tvoří 0 až 4 objemová procenta vzduchu. Velký tlak vodních par a vysoké hodnoty absolutní vlhkosti vzduchu lze očekávat v teplých tropických oblastech, kdežto malý tlak vodních par lze očekávat v chladných polárních oblastech a vyšších nadmořských výškách. [6]

2.4.2 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.

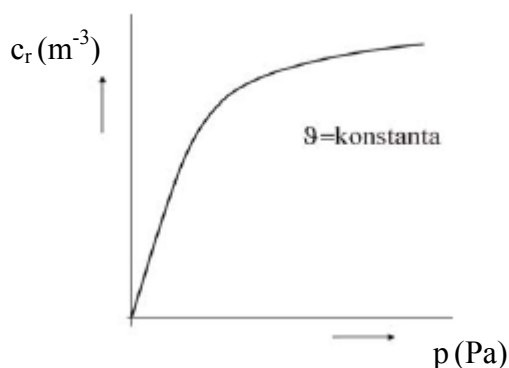
Rovnovážná koncentrace c_r daného sorbenda, tj. sorbované množství (plynu) v sorbentu závisí na jeho tlaku p a teplotě ϑ , takže pro její rovnovážný stav platí

$$c_r = f(p, \vartheta) \quad (24)$$

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

$$c_r = f(p)_\vartheta \quad (25)$$

V praxi často se vyskytující průběh izotermy je uveden na Obr. 6.



Obr. 6: 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

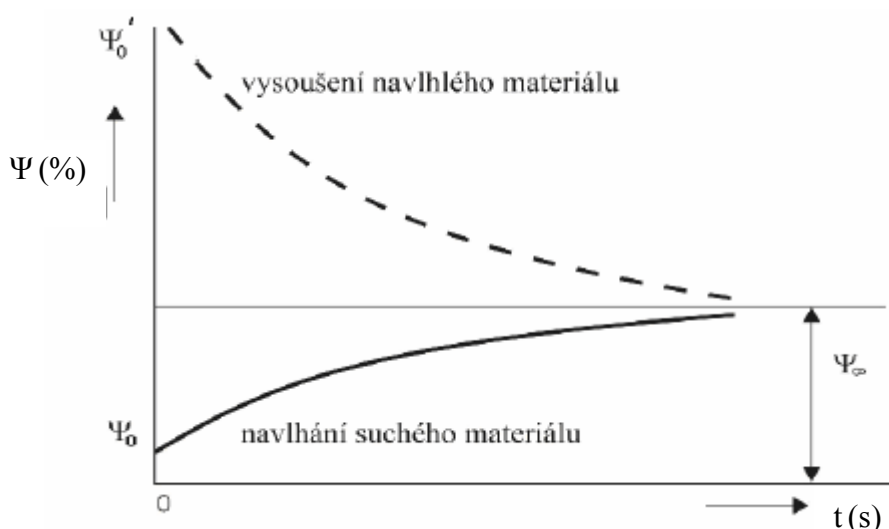
$$\psi = \frac{m - m_0}{m_0} 100 \quad (26)$$

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

$$\varphi' = \frac{m' - m_0}{m_0} 100 \quad (27)$$

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

Proces navlhání je proces dlouhodobý, což je patrné z Obr. 7. 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. 7: Navlhání a vysoušení materiálu při dané vlhkosti a čase

2.4.3 Zvyšování vlhkosti vzduchu

Definované stavy vzduchu je možno vytvořit pomocí vodných roztoků soli 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, je nutno dbát na to, aby obě fáze, kapalná a plynná, byly v termodynamické rovnováze.

Tab. 2: Definovaná vlhkost roztoků solí

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

Snižování vlhkosti vzduchu

Pro snižování obsahu vody (vysoušení) ve vzduchu je možno použít jednak tuhých, jednak kapalných hygroskopických látek. Tyto látky pohlcují vlhkost ze vzduchu až do stavu hygroskopické rovnováhy. U tuhých hygroskopických látek je schopnost pohlcování umožněna především velkým vnitřním povrchem látky; pohlcování vodní páry se děje mechanismem adsorpce a kapilární kondenzace. Při tomto procesu se uvolňuje teplo, které způsobuje zvyšování teplota vysušování vzduchu. Množství vody, které může být ze vzduchu hygroskopickou látkou pohlceno, 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 Experiment

3.1 Vlastnosti měřených vzorků

Předmětem experimentu byl materiál ISONOM NKN 2039 firmy ISOVOLTA Elektroisolerstaffe. Materiál je tvořen tenkou polyamidovou vrstvou Materiálu Kapton, po obou stranách má nechlazený papír Nomex.

První polyimid - Kapton® (chemicky polyimid PI) byl uveden na trh v šedesátých letech minulého století firmou DuPont de Nemours. První aplikace byly v oblasti leteckého, raketového a kosmického průmyslu. Polyamidy se vyznačují jedinečnou kombinací vlastností. Z toho důvodu jsou používány v nejrůznějších průmyslových odvětvích. Své fyzikální, elektrické a mechanické vlastnosti si udržují v širokém rozsahu teplot (-269 °C až $+400\text{ °C}$). V oblasti dielektrických vlastností se podobají silikonům. Obecně se vyrábějí polykondenzací z aromatického dianhydridu (dianhydrid kyseliny pyromellitové) a aromatického diaminu (4,4'-diaminodifenyléter). Vzniklý předpolymer se buď vytvrdí při vyšší teplotě, čímž vznikne fólie nebo se rozpustí, ve vhodném rozpouštědle a získá se lak či lepidlo, které získá konečné vlastnosti vytvrzením při zvýšené teplotě. PI mají špičkovou chemickou odolnost, odolávají široké řadě rozpouštědel, paliv a olejů. Dále vykazují vysokou odolnost vůči kyselinám a alkáliím. Netaví se, splňují nejvyšší třídu samozhášitelnosti UL94-V0. Folie mají vysokou tvarovou stálost. Vzhledem k své stabilitě při nízkých i vysokých teplotách se používají v aplikacích, kde jsou jiné organické polymery nepoužitelné. Jsou vysoce odolné ultrafialovému záření a záření alfa, beta a gamma a slouží proto jako ochrana polovodičových systémů před zářením alfa. Na bázi PI se vyrábí celá řada dalších výrobků. PI lepicí pásy se vyznačují vysokou rozměrovou stabilitou a mohou být používány trvale do teplot 180 °C , krátkodobě do 370 °C . [5]

Aplikace Kaptonu

Elektronika - tlakové spínače, senzory, izolační podložky, fixace motorových vinutí, výroba kondenzátorů, ochranné pásy při pájení desek plošných spojů, vinutí magnetů, flexibilní plošné spoje, ochrana optických kabelů, nosný film pro tape automated bonding (TAB),

mikrofony a reproduktory, výpočetní technika, automobilový průmysl, chemický průmysl, komunikace, komposity, medicína, vojenská technika, lodní technika, hornictví.

Tab. 3: Vlastností Kaptonu

dielektrická pevnost (kVmm ⁻¹)	cca 200
ztrátový činitel (-)	0,0025
poměrná permitivita (-)	3,5
rezistivita (Ωm)	10 ¹⁵
teplota skelného přechodu (°C)	360 až 410
pevnost v tahu (MPa)	172

Drážková izolace Nomex je tepelně odolný materiál, který se používá především jako ochrana před nebezpečnými účinky vysoké teploty. Pro své dobré elektrické, mechanické a chemické vlastnosti je využíván i v elektrotechnice. Používá se zejména pro drážkové izolace, fázové izolace a jinde, kde je potřeba splnit požadavky tepelné třídy H (180 °C). Nomex není elastický a výrazně ztrácí mechanickou pevnost při ohýbání.

Nomex je syntetický aromatický polyamid, zvaný též arami. Jedná se o polymerní látku, která díky své dlouhé molekule a chemickému složení makromolekul odolává vysoké teplotě. Nomex je vyráběn firmou Dupont. Dupont vyrábí vysoce kvalitní materiály pro elektrotechniku i jiné účely s osvědčením kvality ISO9002.

3.2 Měřicí zařízení

Pro experiment bylo použito elektrodového systému v chráněném odstíněném obalu a měřicího zařízení, elektrometru Keithley 6517A.



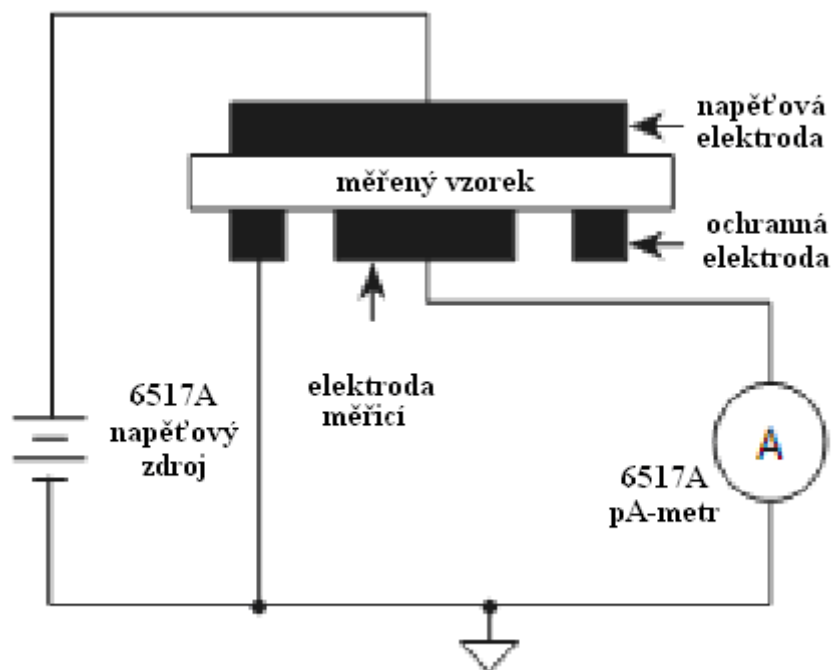
Obr. 8: Elektrometr Keithley 6517A

Toto zařízení v sobě obsahuje napěťový zdroj a zároveň měřicí zařízení s parametry

Tab. 4: Parametry elektrometru Keithley 6517A

	rozsah	přesnost
napěťový zdroj	100 V	± 10 mV
	1000 V	± 100 mV
měření vlhkosti	0-100 %	± 0.3 %
měření teploty	-25 °C až 150 °C	± 1.5 °C
měření proudu	20 pA	1 %
	200 pA	1 %
	2 nA	0,2 %
	20 nA	0,2 %
	200 nA	0,2 %
	2 μ A	0,1 %
	20 μ A	0,1 %
	200 μ A	0,1 %
	2 mA	0,1 %
	20 mA	0,1 %

Na Obr. 9 je znázorněno schématické zapojení elektrodového systému ve spojení s měřicím přístrojem Keithley 6517A. Elektrodový systém se skládá z napěťové a ochranné elektrody.



Obr. 9: Zapojení měřicího pracoviště

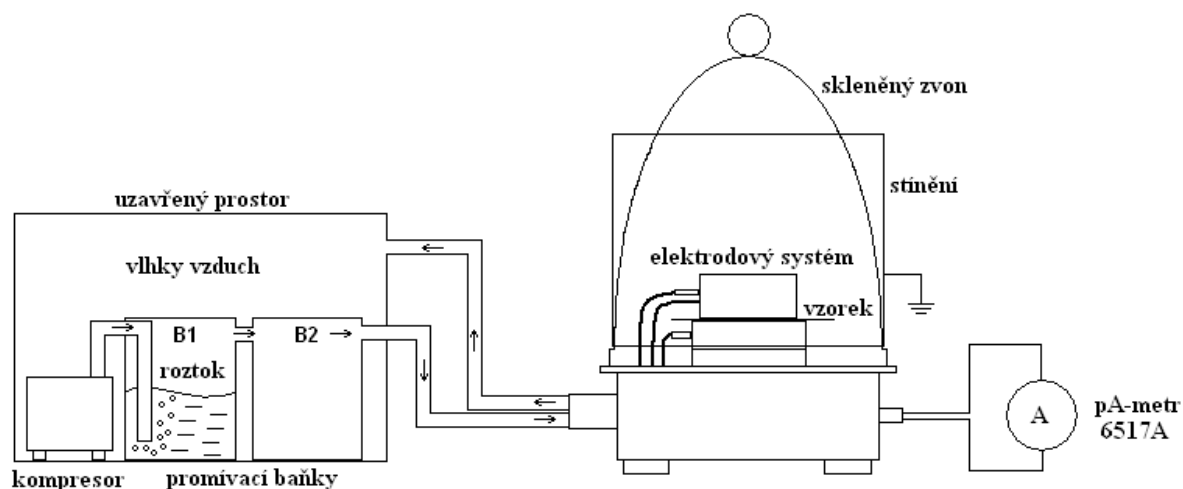
Měřicí zřízení je přes seriové rozhraní připojeno k počítači, vybaveném ovládacím programem pro nastavení parametrů měření. Přes objektové prostředí lze programovat chování přístroje a definovat potřebné výstupy do programu Microsoft Office Excel.

3.3 Příprava vzorku

Pro experiment byly použity vzorky stárnuté při zpracování bakalářských a diplomových pracích v předchozích letech. Rozměry vzorků jsou 80 mm x 80 mm s průměrnou tloušťkou 0,32 mm. Vzorky byly stárnuty v peci při teplotách 200 °C a 220 °C. Měření probíhalo při vlhkostech 10 %, 33 %, 75 % a 95 %.

Před měřením byly vzorky označeny a vloženy do exsikátoru s molekulovým sítem, aby došlo k vysušení okolní vlhkosti. V prostředí s příslušnou relativní vlhkostí byly vzorky ponechány vždy po dobu 14-ti dnů v exsikátoru s roztokem soli pro dosažení požadované vlhkosti.

3.4 Postup měření

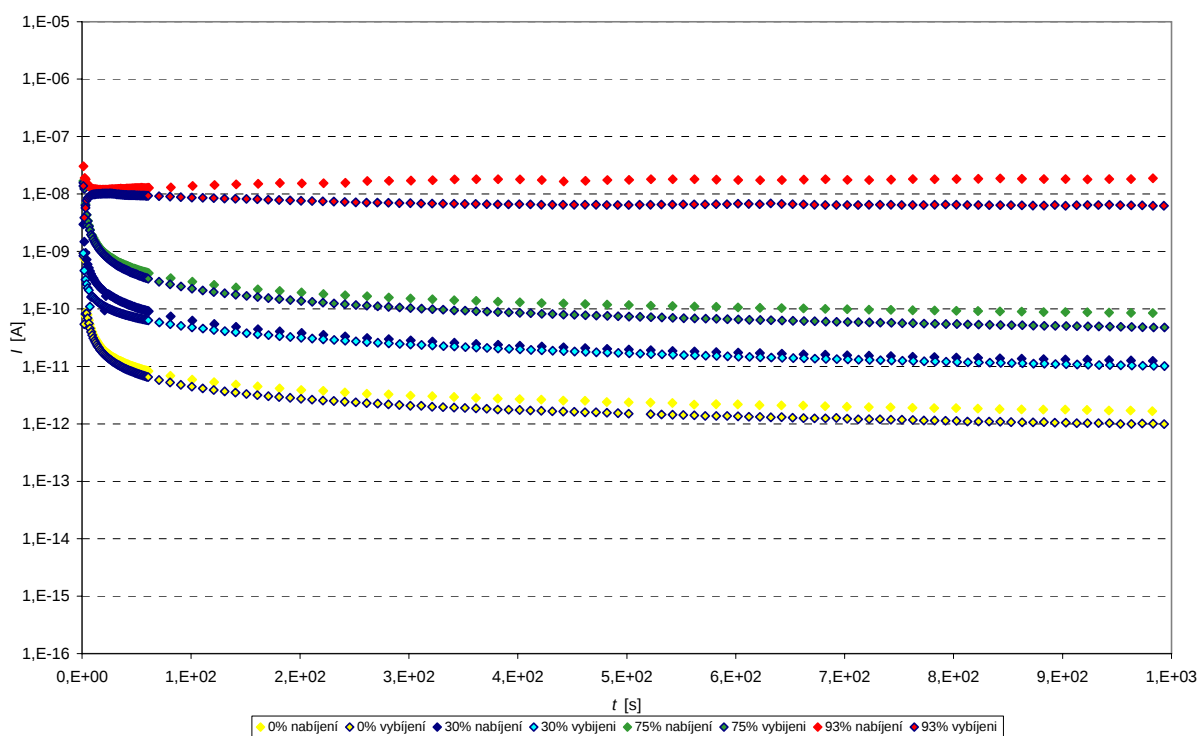


Obr. 10: Měřicí pracoviště s přípravkem pro zvyšování vlhkosti

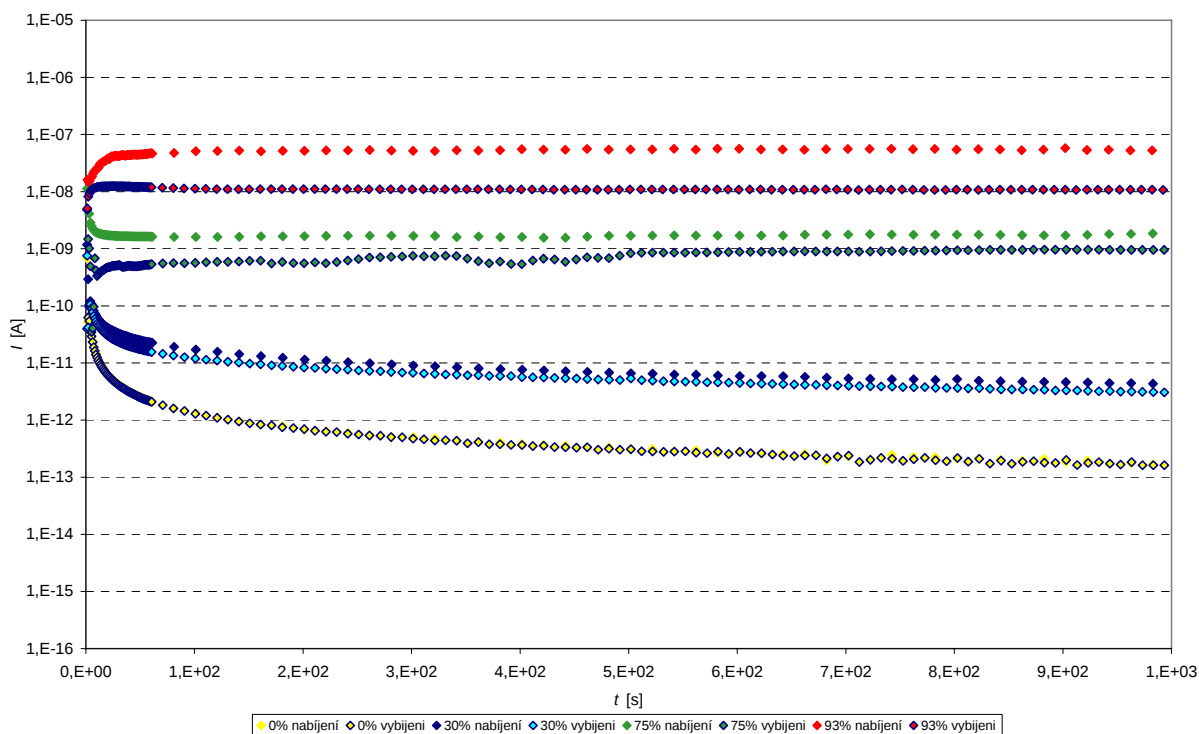
Měření bylo realizováno na elektrodovém systému uzavřeném pod skleněným zvonem. Skleněný zvon byl opatřen stíněním, které snižovalo vliv elektrického vlnění okolí. Při měření vzorku za nejnižší vlhkosti postačilo k elektrodovému systému přiložit molekulové síto, které snižovalo vlhkost okolí. U měření s vyšší relativní vlhkostí okolí již bylo zapotřebí vlhkost vzduchu zvyšovat na požadovanou hodnotu. Pro dosažení požadované relativní vlhkosti bylo vybráno vlhnutí pomocí roztoků solí v baňce B1, kdy druhá baňka B2 sloužila jako nádoba pro zachycení kapek vody, které vznikaly při probublávání. Pro rychlejší nárůst vlhkosti byl roztok probubláván akvariijním kompresorem, celé zařízení bylo uzavřeno v prostoru, do kterého neměl přístup okolní vzduch a vlhkost. Jelikož se jednalo o uzavřený okruh, vzduch byl pod skleněný zvon vháněn i odsáván, a tím došlo k cirkulaci vzduchu v prostředí elektrodového systému.

3.5 Grafické závislosti, Výsledky měření

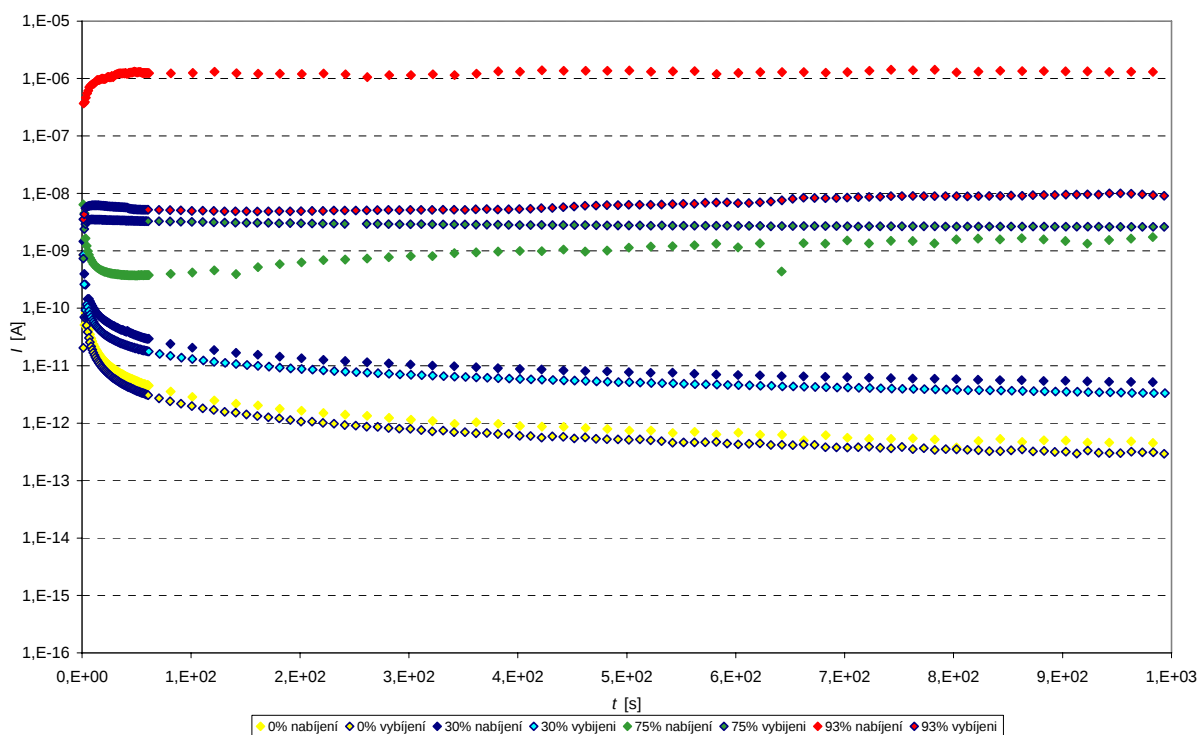
Vliv relativní vlhkosti na časové průběhy nabíjecích a vybíjecích proudů



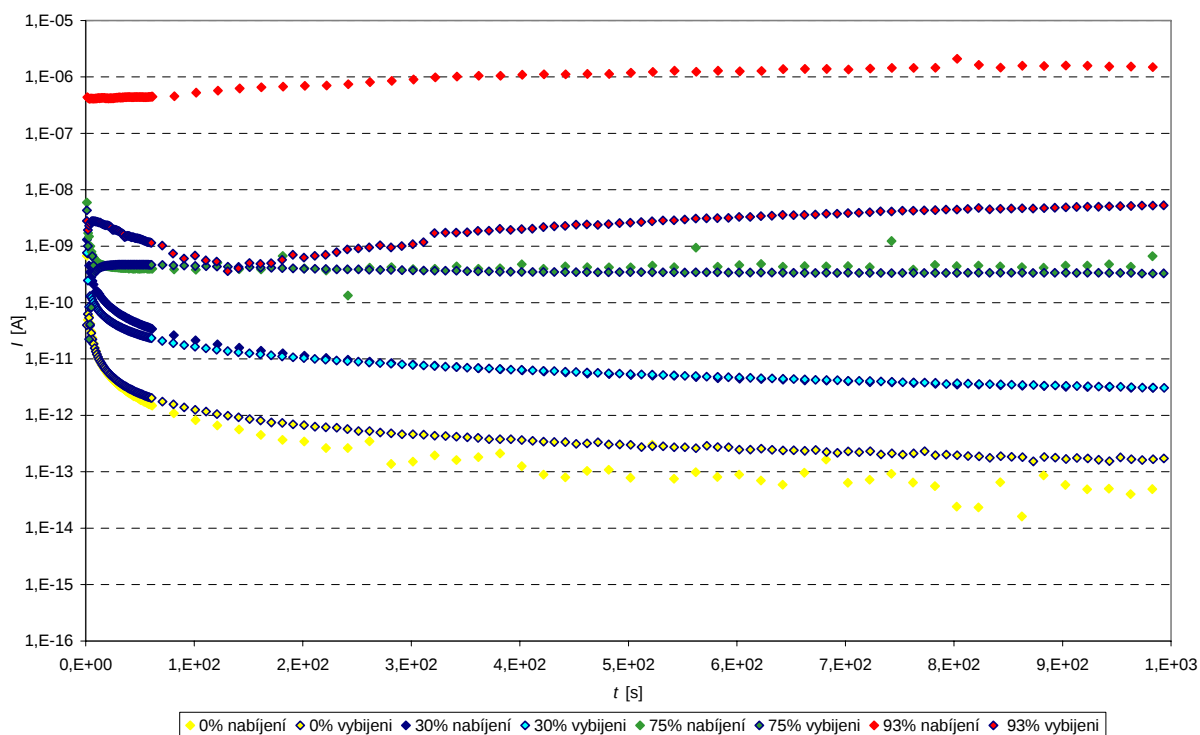
Obr. 11: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u nestárnutého vzorku



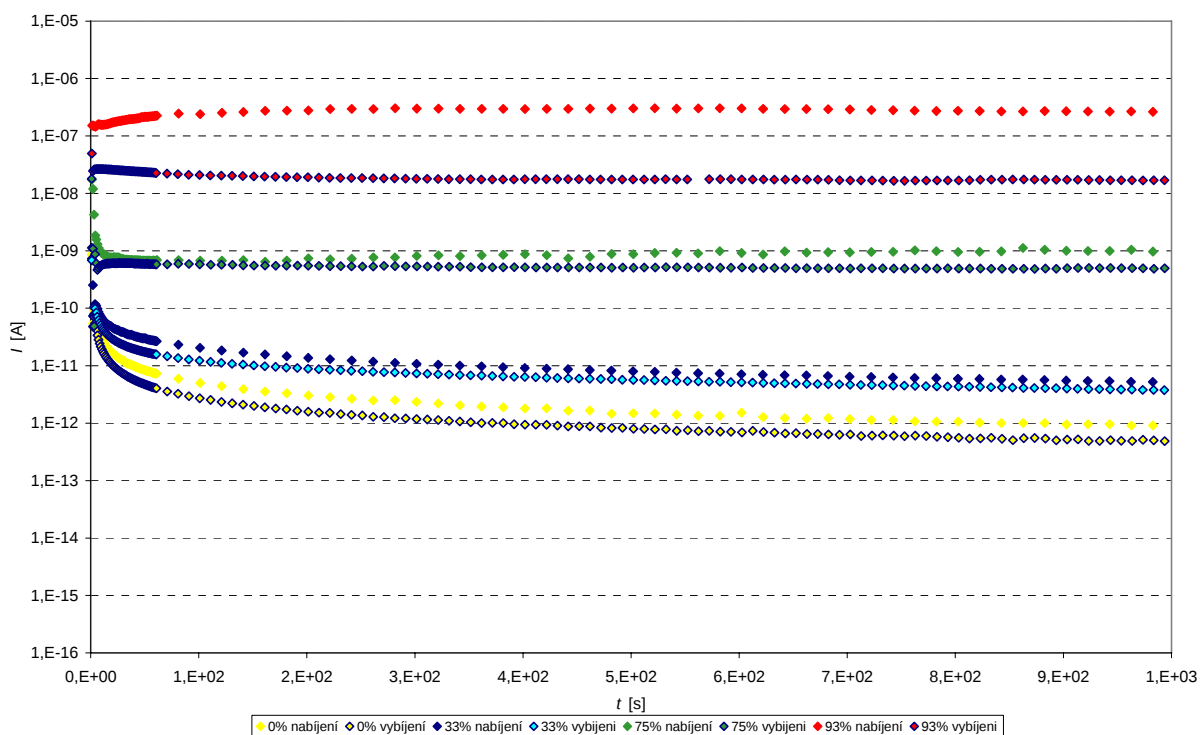
Obr. 12: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (250 h, 220 °C)



Obr. 13: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (500 h, 220 °C)



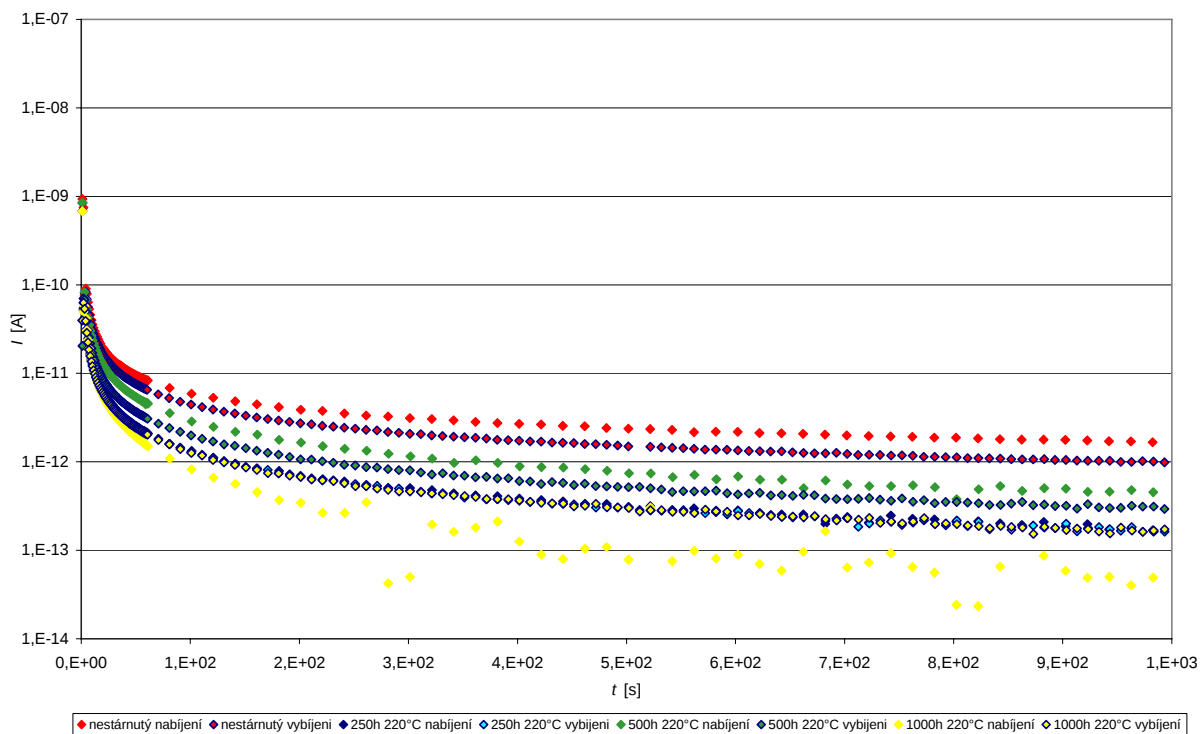
Obr. 14: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (1000, h 220 °C)



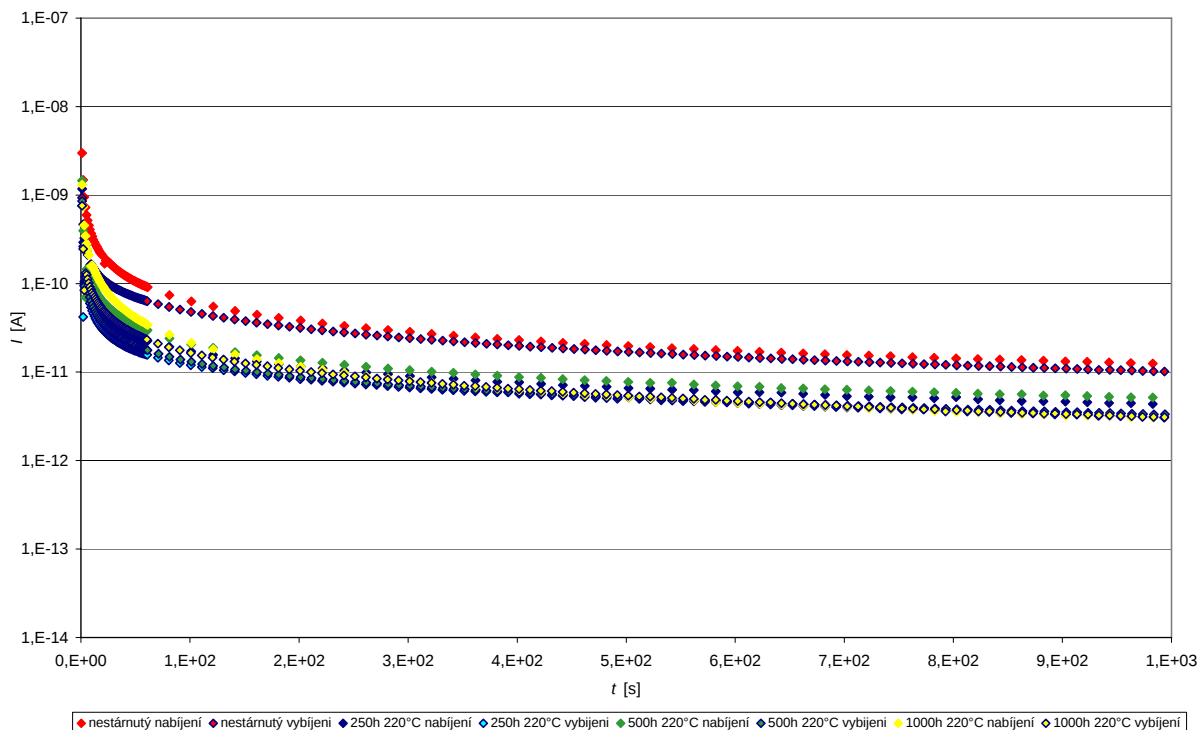
Obr. 15: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (1000 h, 200 °C)

Z výsledků měření zpracovaných formou časových závislostí nabíjecích a vybíjecích proudů vyplývá, že se vzrůstající relativní vlhkostí se absolutní hodnoty nabíjecích i vybíjecích proudů zvyšují (Obr. 11, Obr. 12, Obr. 13, Obr. 14, Obr. 15).

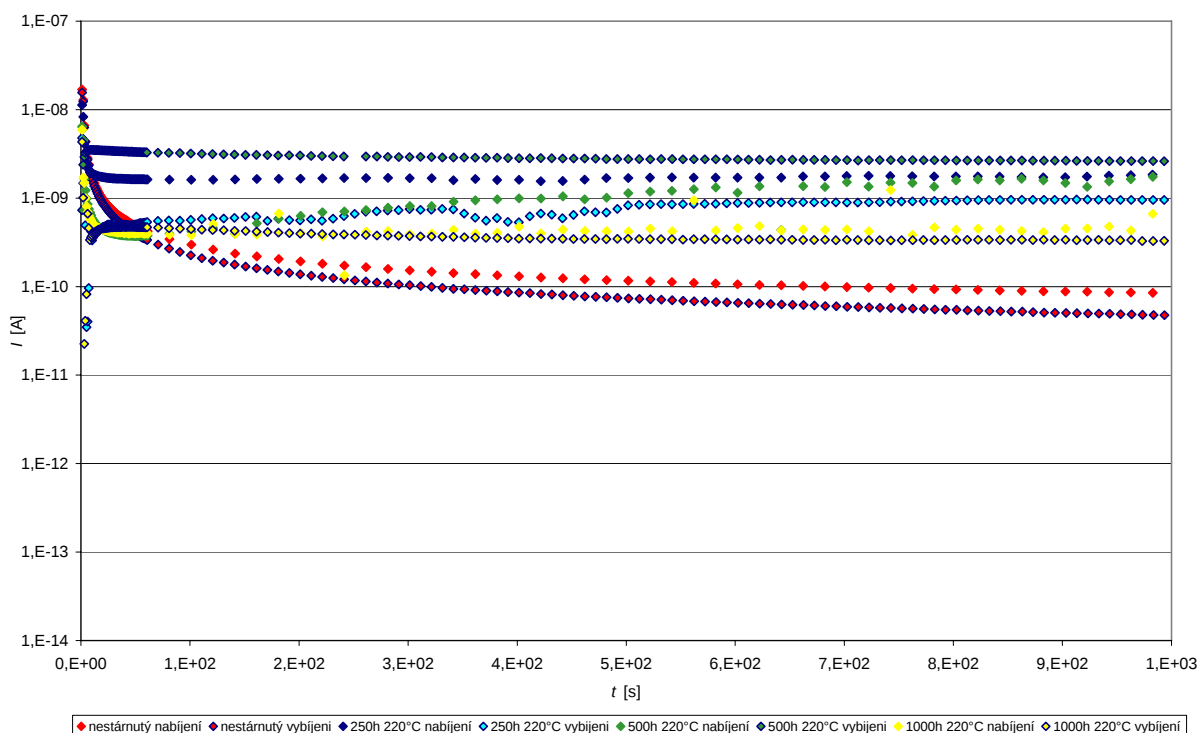
Vliv doby stárnutí na časové průběhy nabíjecích a vybíjecích proudů



Obr. 16: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů vzorku při 10% relativní vlhkosti na době stárnutí



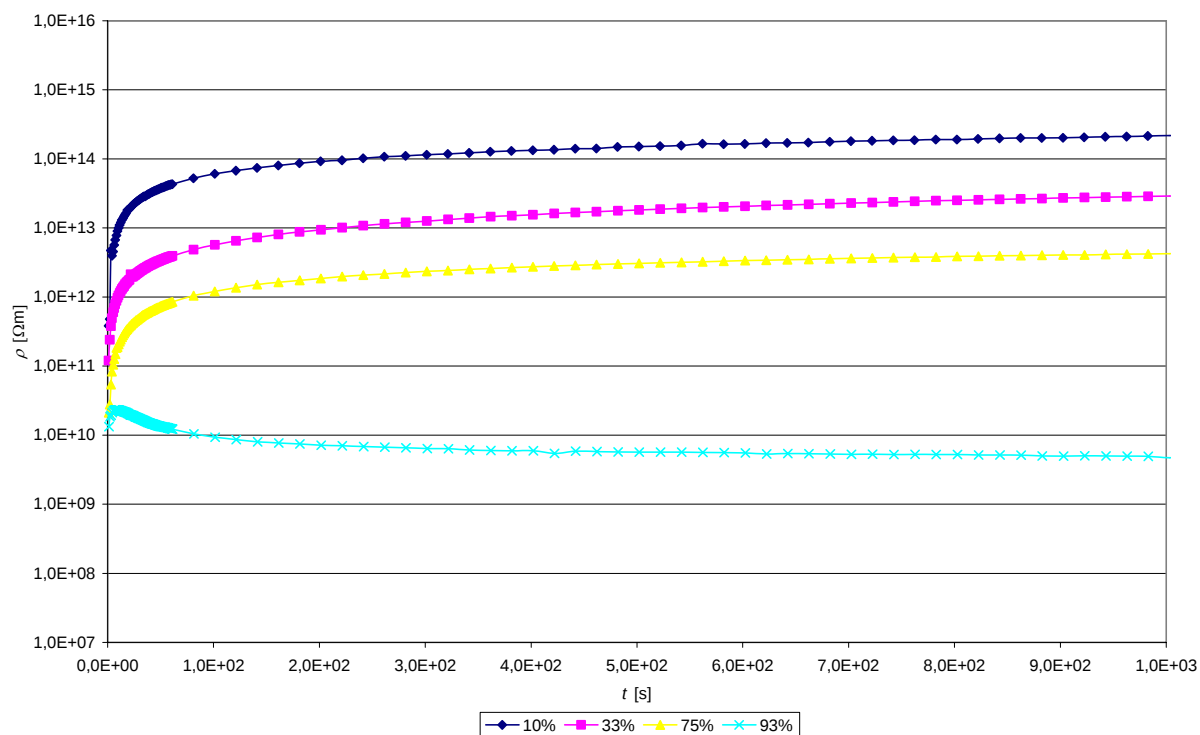
Obr. 17: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů vzorku při 33% relativní vlhkosti na době stárnutí



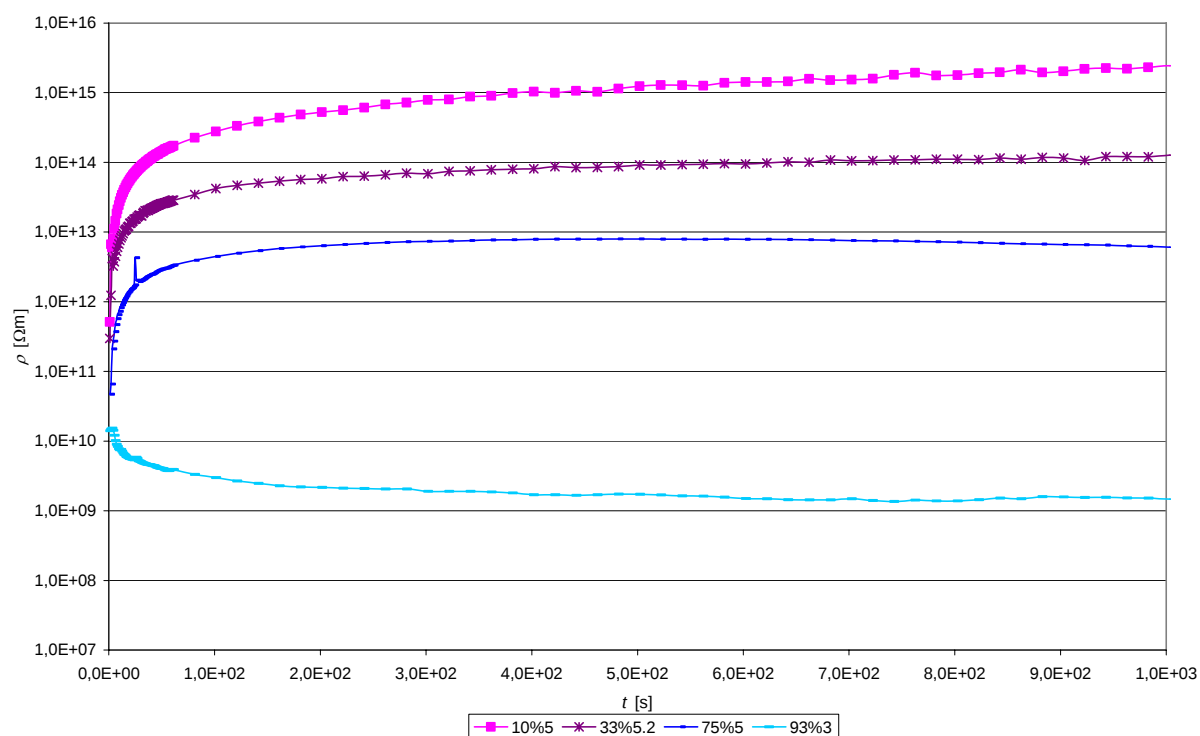
Obr. 18: Závislost nabíjecích a vybíjecích proudů vzorku při 75% relativní vlhkosti na době stárnutí

Grafické závislosti na Obr. 16 až Obr. 18 zobrazují vliv doby stárnutí na časové průběhy nabíjecích a vybíjecích proudů. Ukazuje se, že ve vysušeném stavu jeví předložený materiál se vzrůstající dobou stárnutí tendenci ke zlepšení izolačních schopností, kdežto v navlhnutém stavu se se zvyšující dobou stárnutí tato schopnost snižuje. Pro vytvoření jednoznačného závěru by ale bylo potřeba měření opakovat, což je s ohledem na časovou náročnost experimentu v rámci této práce nerealizovatelné.

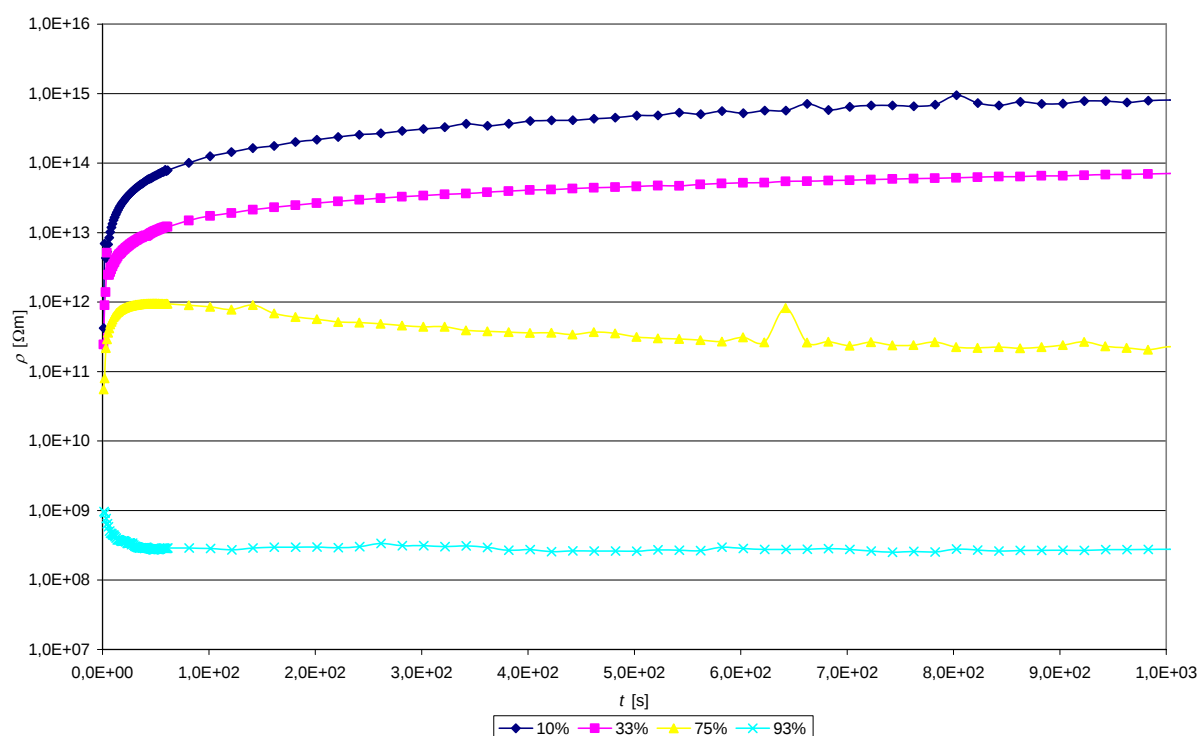
Vliv relativní vlhkosti na časovou závislost rezistivity



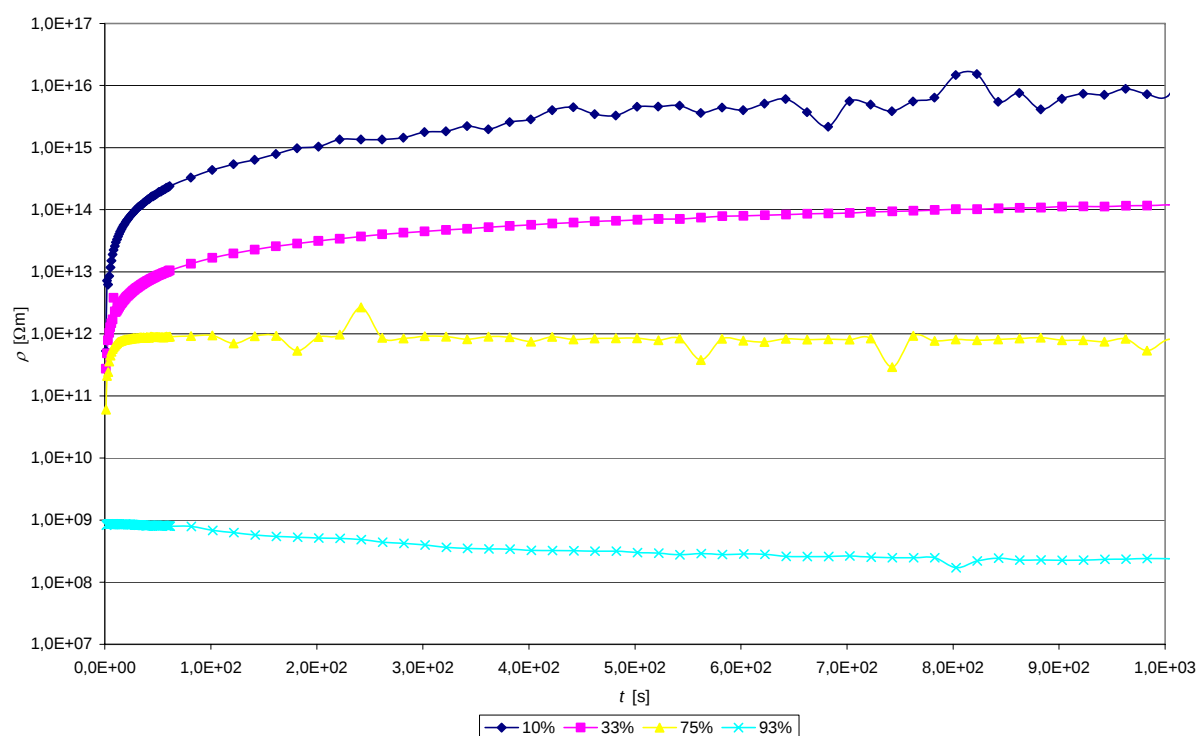
Obr. 19: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u nestárnutého vzorku



Obr. 20: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (250 h 220 °C)



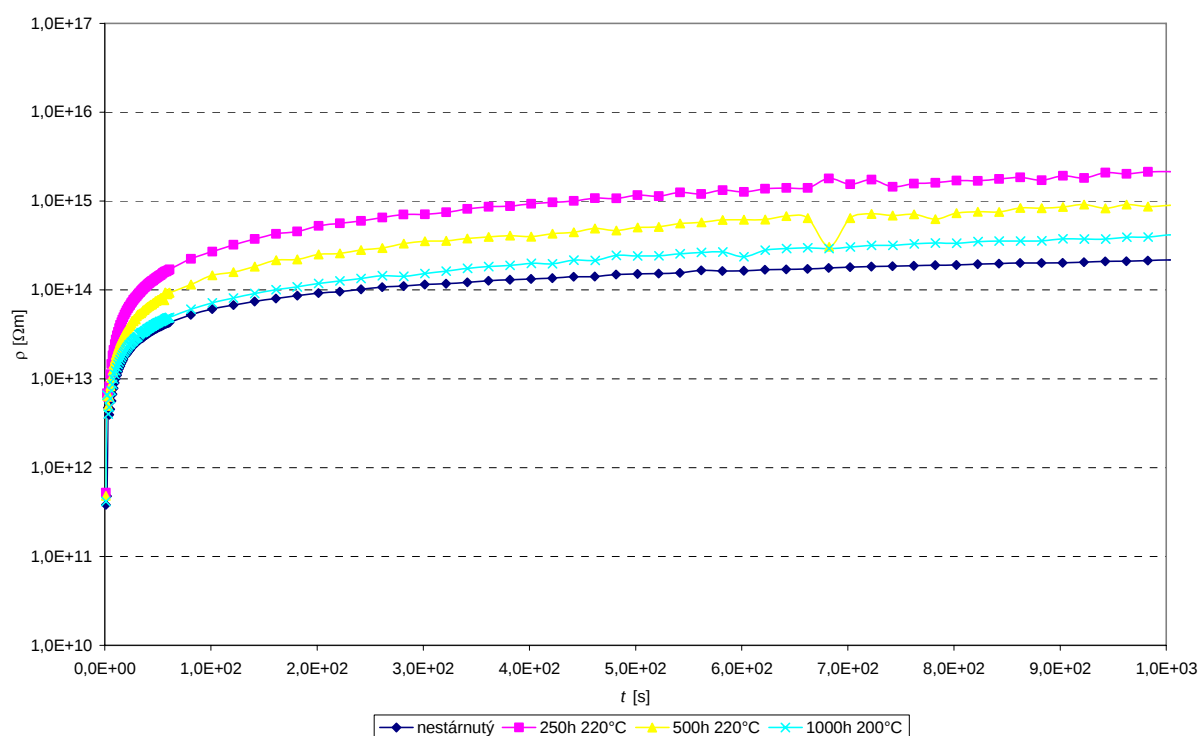
Obr. 21: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (500 h 220 °C)



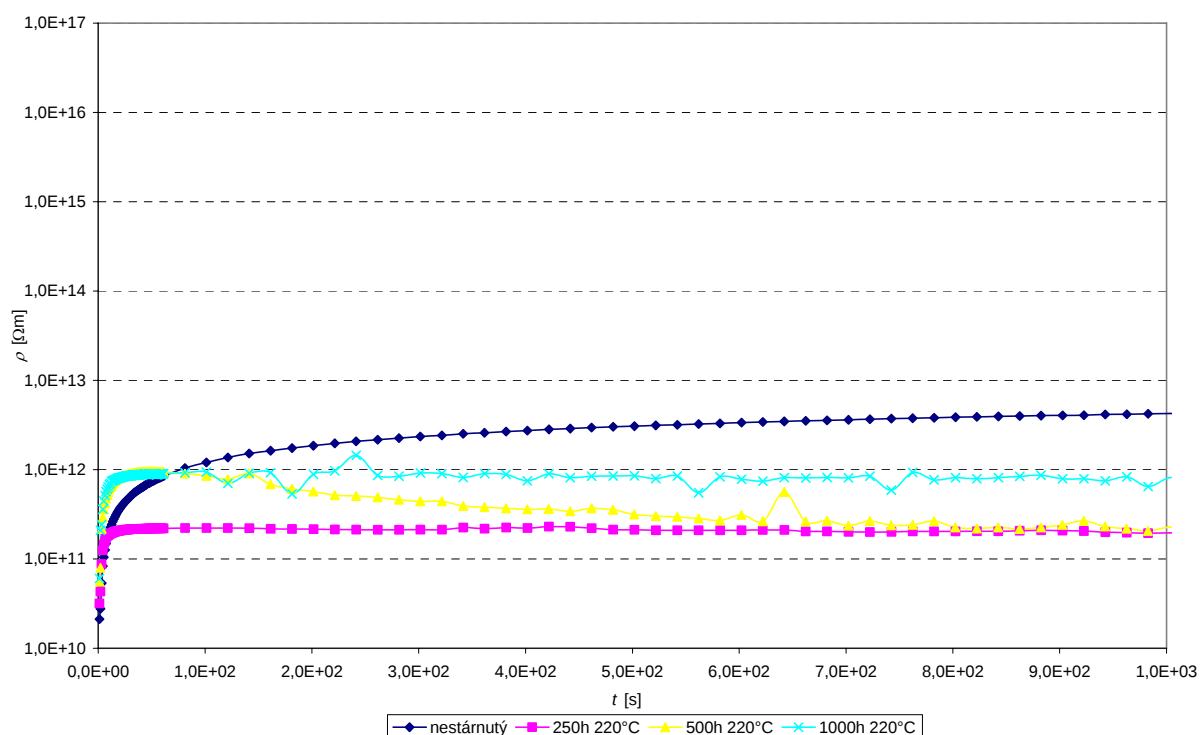
Obr. 22: Závislost rezistivity vzorku na relativní vlhkosti u stárnutého vzorku (1000 h 220 °C)

Z výsledků měření zpracovaných formou časových závislostí rezistivity vzorků vyplývá, že se vzrůstající relativní vlhkostí rezistivita klesá (Obr. 19, Obr. 20, Obr. 21, Obr. 22), tzn. že se nežádoucím způsobem zvyšuje konduktivita zkoumaného materiálu.

Vliv doby stárnutí na časový průběh rezistivity



Obr. 23: Závislost rezistivity vzorku při 10% relativní vlhkosti na době stárnutí



Obr. 24: Závislost rezistivity vzorku při 75% relativní vlhkosti na době stárnutí

Z výsledků měření zpracovaných formou časové závislosti rezistivity vzorků s parametrem doby stárnutí vyplývá, že se vzrůstající dobou stárnutí a relativní vlhkostí prostředí se u

zkoumaného materiálu projevuje tendence ke zhoršování elektroizolačních vlastností (Obr. 23, Obr. 24). Pro vytvoření jednoznačného závěru by bylo potřeba měření několikrát opakovat, což bylo s ohledem na časovou náročnost experimentu v rámci této práce nerealizovatelné.

4 Závěr

Bakalářská práce se zabývá pozorováním vlastností drážkové izolace, na bázi polyesterové fólie, v závislosti na vlhkosti a době stárnutí vzorků. Na všech vzorcích byly změřeny nabíjecí, vybíjecí proudy a vypočteny rezistivity.

Při měření vysušených vzorků se objevily problémy, jelikož proudy byly velmi malé a měření se tím stalo velmi náchylné na okolní rušení. Při vyšších vlhkostech se rušení již tolik neprojevovalo, jelikož se proudy se vzrůstající relativní vlhkostí zvyšují. Ukázal se problém však při vysoké relativní vlhkosti, kdy byl vzorek náchylný ke kondenzaci vody ve struktuře materiálu a v důsledku toho hrozilo zkratování elektrody, které by vedlo k velmi rychlému oblastnímu vybití.

Při měření ve vyšších relativních vlhkostech bylo zapotřebí kontrolovat vlhkostní zařízení, aby nedocházelo k ucpávání trubičky ponořené do solného roztoku krystalizací soli.

Během experimentu byl proveden rozsáhlý soubor měření. Pro větší přehlednost práce, jsou zde uvedeny vybrané grafické závislosti. Veškeré údaje získané v rámci experimentálních prací jsou vloženy na CD-rom.

Přes veškeré potíže a některé nesrovnalosti ve výsledcích experimentálních prací se jeví materiál ISONOM NKN jako výborný elektroizolační materiál, 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] Poljak, F.: Štruktúra a vlastnosti materiálov 2 – Izolanty a dielektrika. Bratislava , 1986
- [5] Vlastnosti materiálu Kapton [cit. 2006-20-12]. Dostupné z WWW: <http://www.elchemco.cz>
- [6] Vlhkost [cit. 2006-03-05] Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlhkost>
- [7] Dielektrická pevnost [cit. 2006-12-05]Dostupné z WWW: <http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/515859-prurazne-napeti>