

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dielektrická spektroskopie pevných izolačních materiálů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin NOVOSAD**
Osobní číslo: **E12B0082K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Dielektrická spektroskopie pevných izolačních materiálů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v ý p r a c o v á n í :

1. Popište dielektrický systém elektrických strojů a zařízení obsahující kompozitní dielektrika.
2. Popište základní principy polarizace, vodivosti a ztrát pevných dielektrik.
3. Proveďte vyhodnocení dodaných dat měřených pomocí metody dielektrické spektroskopie.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. MENTLÍK, Václav a kol. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN-technická literatura, 2008, 438 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. ELEKTRONICKÉ INFORMAČNÍ ZDROJE.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Ulrych**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na chování dielektrických materiálů ve střídavém elektrickém poli. Jejím cílem je porovnání specifických dielektrických vlastností a chemické struktury měřených vzorků polyetylentereftalátové (PET) a polyetylenaftalátové (PEN) fólie. Teoretická část objasňuje jak pojem dielektrikum, tak základní principy mechanismů, které se odehrávají uvnitř dielektrika. V experimentální části bylo realizováno měření ve střídavém poli a vzorky polymerních materiálů byly zkoumány v závislosti na teplotě a frekvenci. Měření bylo prováděno metodou dielektrické spektroskopie. Výsledky měření ukazují na rozdílné dielektrické vlastnosti a mohou být dále využity ke stanovení vhodnosti použití daných materiálů v elektroizolačních aplikacích.

Klíčová slova

Dielektrikum, izolant, polarizace, permitivita, ztráty v dielektriku, vodivost, reálná složka komplexní permitivity, imaginární složka komplexní permitivity, kompozit, dielektrická spektroskopie.

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on the behavior of dielectric materials in an alternating electric field. Its aim is to compare specific dielectric properties and chemical structure of the measured samples of polyethylene terephthalate (PET) and polyethylene naphthalate (PEN) films. The theoretical part explains as the concept of the dielectric so fundamental principles of mechanisms that taking place inside the dielectric. The experimental part was carried out by measurement in the alternating field and samples of polymer materials were investigated in dependence on temperature and frequency. The measurement was performed by dielectric spectroscopy method. The measurement results show the different dielectric properties and can be further used for determining the suitability of the use of the materials in electrical insulating applications.

Key words

Dielectric, insulator, polarization, permittivity, dielectric losses, conductivity, real component of the complex permittivity, imaginary component of the complex permittivity, composite, dielectric spectroscopy.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Martin Novosad

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Ulrychovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Děkuji za trpělivost, ochotu a vstřícnost po celou dobu psaní této práce.

Rád bych také poděkoval své rodině, především mé ženě za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	11
1 ZÁKLADNÍ ASPEKTY PEVNÝCH DIELEKTRIK.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ SLOŽENÍ LÁTKY	12
1.1.1 Elektrotechnická látka a materiál.....	12
1.1.2 Obecné rozdělení elektrotechnických materiálů	12
1.1.3 Vlastnosti nosičů elektrických nábojů	12
1.2 DIELEKTRICKÝ PODSYSTÉM.....	13
1.2.1 Obecné rozdělení dielektrik	14
1.2.2 Rozdělení dielektrik podle skupenství a struktury.....	14
1.2.3 Rozdělení dielektrik podle polárnosti	15
1.3 POLARIZACE DIELEKTRIKA	16
1.3.1 Polarizační mechanismy	17
1.3.1.1 S působením vnějšího elektrického pole	18
1.3.1.2 Bez působení vnějšího elektrického pole	21
1.3.2 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli	22
1.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST DIELEKTRIK	24
1.4.1 Elektrická vodivost pevných izolačních materiálů.....	26
1.4.2 Povrchová vodivost pevných izolačních materiálů	28
1.5 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	29
1.5.1 Druhy dielektrických ztrát	29
1.5.2 Ztráty podle druhu působícího napětí	31
1.5.3 Ztráty v pevných izolačních materiálech.....	32
1.5.4 Ztráty v heterogenních izolačních materiálech.....	34
1.6 IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	34
1.6.1 Kompozitní materiály v izolačních systémech elektrických strojů	35
1.6.2 Klasifikace materiálů v elektroizolačních systémech.....	37
1.6.3 Diagnostika izolačních systémů.....	38
2 MĚŘENÍ VYBRANÝCH DIELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ.....	38
2.1 POPIS MĚŘENÝCH MATERIÁLŮ	39
2.2 POPIS MĚŘENÍ A VYBAVENÍ PRO MĚŘENÍ.....	39
2.3 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT.....	41
ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50

Seznam obrázků a tabulek

OBR. 1.2.1 DIELEKTRIKA A IZOLANTY	14
OBR. 1.2.2 ROZDĚLENÍ DIELEKTRIK	15
OBR. 1.2.3 POLÁRNÍ DIELEKTRIKUM	16
OBR. 1.2.4 NEPOLÁRNÍ DIELEKTRIKUM	16
OBR. 1.3.1 ROZDĚLENÍ POLARIZAČNÍCH MECHANISMŮ	17
OBR. 1.3.2 SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ELEKTRONOVÉ POLARIZACE NA MODELU ATOMU VODÍKU	19
OBR. 1.3.3 VZNIK DIPÓLOVÉHO MOMENTU	19
OBR. 1.3.4 VZNIK PROSTOROVÉHO NÁBOJE V NEHOMOGENNÍM DIELEKTRIKU	21
OBR. 1.3.5 GRAFICKÉ VYJÁDRĚNÍ KOMPLEXNÍ PERMITIVITY	23
OBR. 1.4.1 PROUD TEKOUcí PO POVRCHU IZOLANTU	28
OBR. 1.5.1 ZÁVISLOST POLARIZACE NA INTENZITĚ ELEKTRICKÉHO POLE	30
OBR. 1.5.2 FÁZOROVÝ DIAGRAM REÁLNÉHO DIELEKTRIKA	31
OBR. 1.5.3 TEPLOTNÍ A FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA TG Δ NEPOLÁRNÍCH PEVNÝCH IZOLANTŮ	32
OBR. 1.5.4 TEPLOTNÍ A FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA TG Δ POLÁRNÍCH PEVNÝCH IZOLANTŮ	33
OBR. 2.2.1 FREKVENČNÍ ANALYZÁTOR ALPHA-A (NOVOCONTROL)	39
OBR. 2.2.2 POHLED NA ELEKTRODOVÝ SYSTÉM ZGS (NOVACONTROL) A) V CELKU, B) V DETAILU	40
OBR. 2.2.3 CELKOVÝ POHLED NA ROZMÍSTĚNÍ PŘÍSTROJŮ A) BEZ VLOŽENÉHO ELEKTRODOVÉHO SYSTÉMU ZGS V KRYOSTATU, B) S VLOŽENÝM ELEKTRODOVÝM SYSTÉMEM ZGS V KRYOSTATU	40
OBR. 2.2.4 POHLED NA SYSTÉM QUATRO CRYOSYSTEM (NOVOCONTROL).....	41
OBR. 2.3.1 CHEMICKÁ STRUKTURA PET FÓLIE	42
OBR. 2.3.2 CHEMICKÁ STRUKTURA PEN FÓLIE	42
OBR. 2.3.3 CHEMICKÁ STRUKTURA: A) FENYL, B) NAFTALÁT, C) ESTER	42
OBR. 2.3.4 ZÁVISLOST REÁLNÝCH A IMAGINÁRNÍCH ČÁSTÍ KOMPLEXNÍ PERMITIVITY PET A PEN FÓLIE NA TEPLOTĚ PŘI FREKVENCI 50 HZ.....	43
OBR. 2.3.5 ZÁVISLOST ZTRÁTOVÝCH ČINITELŮ PET A PEN FÓLIE NA TEPLOTĚ PŘI FREKVENCI 50 HZ.....	44
OBR. 2.3.6 ZÁVISLOST REÁLNÉ ČÁSTI KOMPLEXNÍ PERMITIVITY PET FÓLIE NA TEPLOTĚ A FREKVENCI.....	46
OBR. 2.3.7 ZÁVISLOST IMAGINÁRNÍ ČÁSTI KOMPLEXNÍ PERMITIVITY PET FÓLIE NA TEPLOTĚ A FREKVENCI.....	46
OBR. 2.3.8 ZÁVISLOST REÁLNÉ ČÁSTI KOMPLEXNÍ PERMITIVITY PEN FÓLIE NA TEPLOTĚ A FREKVENCI	47
OBR. 2.3.9 ZÁVISLOST IMAGINÁRNÍ ČÁSTI KOMPLEXNÍ PERMITIVITY PEN FÓLIE NA TEPLOTĚ A FREKVENCI	47
TAB. 1.6.1 TEPLOTNÍ KLASIFIKACE IZOLANTŮ	37

Seznam symbolů a zkratk

PET	Polyetylentereftalát
PEN	Polyetylnaftalát
PVC	Polyvinylchlorid
ε^* (-).....	Komplexní permitivita
ε' (-)	Reálná složka komplexní permitivity
ε'' (-).....	Imaginární složka komplexní permitivity
ε (-).....	Permitivita dielektrika
ε_0 (F·m ⁻¹).....	Permitivita vakua
ε_r (-)	Relativní permitivita
q (C).....	Elementární elektrický náboj
γ (S·m ⁻¹).....	Měrná elektrická vodivost (konduktivita)
ρ (Ω·m)	Měrný elektrický odpor (rezistivita)
δ (°).....	Ztrátový úhel
tg δ (-)	Ztrátový činitel

Úvod

Každé elektrické zařízení lze chápat jako systém vzájemně spojených a spolupracujících podřadných systémů. Podle vykonávací funkce je dělíme na mechanický, magnetický, elektrický, dielektrický a termoventilační subsystém. Všechny tyto články tvoří jeden sériový spolehlivostní řetězec a při výpadku jedno z nich je ohrožena funkčnost celého zařízení. Klíčovým článkem můžeme označit právě dielektrický podsystém, který se svojí povahou určitě nejvíce podílí na životnosti a spolehlivosti celého zařízení.

Dielektrický systém se skládá z prvků, které z technologických důvodů obsahují organické komponenty. Jedná se o velmi citlivé látky vůči vlivům prostředí i technologiím, které na ně působí při výrobě i provozu a mohou vyvolat nevratné reakce. Tyto komponenty se tak logicky stávají nejcitlivějším prvkem uvedeného řetězce. V izolačních systémech elektrických točivých strojů jde o izolanty, které jsou tvořeny nejčastěji ze syntetických makromolekulárních látek, zkráceně polymerů.

Z hlediska původu se pevná dielektrika dělí na organická a anorganická. Z pohledu struktury se dělí na amorfni a krystalické, načež organické látky se dále dělí na syntetické a přírodní. Podle zpracování se pak rozdělují na elastomery, termoplasty a reaktoplasty. Vzhledem k zaměření této práce jsou zajímavé syntetické organické látky, na bázi sloučenin uhlíku a dalších prvků vhodných pro výrobu vysoko nebo nízkomolekulárních látek (polymerů). Výborných fyzikálních vlastností polymerů se využívá při výrobě moderních kompozitních materiálů. Jedná se o rozmanitý soubor materiálů vykazující vynikající dielektrické vlastnosti, které svými parametry splňují nejvyšší požadavky na elektroizolační systémy zejména vysokonapěťových pohonů.

Text v této bakalářské práci je možné rozdělit do dvou částí. Úkolem první části je přehledně popsat základní aspekty fyziky pevných dielektrik a dielektrického systému obecně. Cílem druhé části je z naměřených dat vyhodnotit závislost reálné a imaginární složky komplexní permitivity vzorků polymerních materiálů na teplotě okolního prostředí a frekvenci vnějšího elektrického pole. Pro tuto experimentální úlohu byli vybráni konkrétní zástupci syntetických termoplastických polyesterů, PET a PEN fólie. Měření bylo provedeno metodou dielektrické spektroskopie.

1 Základní aspekty pevných dielektrik

1.1 Základní složení látky

Každou látku lze chápat jako hmotu, kterou tvoří složitý chemický systém. Při hlubším zkoumání její struktury vyplývá, že každá forma hmoty se skládá ze systémů molekul, které představují další systémy. Z pohledu struktury látky je nejmenším systémem atomové jádro, které je složeno z kladně nabitých protonů a elektricky neutrálních neutronů, dohromady nazývané nukleony. Každé atomové jádro je uzavřeno v atomovém obalu a tvoří tak elementární částici každého systému zvanou atom. Prostor v obalu okolo jádra vyplňují záporně nabitě elektrony a při jejich počtu shodném s nukleony v jádře je atom elektricky neutrální. [1-4]

1.1.1 Elektrotechnická látka a materiál

Na začátek je potřeba uvést, jaký je rozdíl mezi látkou a materiálem. Byť se zdá význam podobný, **látka** je forma hmoty, kde základním stavebním prvkem je systém tvořený z molekul či atomů a to ve formě čistých prvků nebo různých chemických sloučenin. Naproti tomu **materiál** je už výrobkem ze surovin - látek, určených pro konkrétní využití v technické praxi. [1, 3, 4]

1.1.2 Obecné rozdělení elektrotechnických materiálů

Obecně lze říci, že materiál vyrobený za určitým účelem, tak aby získal specifické vlastnosti v elektrickém nebo magnetickém poli, se nazývá **elektrotechnický materiál**. Pro úspěšnou aplikaci v elektrotechnickém zařízení je nutná znalost vlastností jednotlivých složek charakterizující daný materiál. Z pohledu vlastností a aplikace existují tři způsoby rozdělení elektrotechnických materiálů a látek. Způsoby rozdělení jsou podle struktury, skupenství a vlastností nosičů elektrického náboje. Struktura nám dává informaci o vnitřních vazbách v látce. Podle skupenství je možné rozdělit látky na plynné, kapalné a pevné. [1, 3, 4]

1.1.3 Vlastnosti nosičů elektrických nábojů

Nosičem elektrického náboje může být elektron nebo iont, obecně částice nesoucí elementární náboj q . V závislosti na struktuře látky a velikosti vnitřních vazebních sil se nosiče náboje dělí na volné a vázané. [2, 5]

Volné nosiče elektrického náboje jsou částice, které se mohou volně pohybovat materiálem, a s rostoucí koncentrací se významně ovlivňuje vodivost látek. Ta je jako vlastnost pro látky charakteristická a znamená, že látky vodivé, polovodivé a dielektrické (resp. izolanty) budou mít rozdílné chování po vložení do vnějšího elektrického pole. Největší koncentrace volných nosičů je v kovech a jedná se o vlastní vodivost látky. Na toku elektrického proudu se mohou podílet i ionty a kationty. V případě izolantů a dielektrik vznikají volné nosiče z molekul cizích látek (příměsí) a hovoří se pak o vodivosti nevlastní. [2, 5, 6]

Vázané nosiče náboje jsou naopak pevně uchyceny ve struktuře látky a na působení elektrického pole reagují pouze malou či větší změnou své polohy. Znamená to, že pohyb je omezen vazbami atomů a strukturou krystalové mřížky. [2, 5]

Jak již bylo naznačeno, chování látek závisí na koncentraci a druhu nosičů elektrického náboje. Právě podle koncentrace volných nosičů náboje se rozdělují reálné materiály podle hodnoty jejich konduktivity γ následovně:

- Vodiče $\gamma > 10^5$ ($S \cdot m^{-1}$)
- Polovodiče $10^{-8} < \gamma < 10^5$ ($S \cdot m^{-1}$)
- Izolanty $\gamma < 10^{-5}$ ($S \cdot m^{-1}$)

Zařazení každého materiálu do příslušné skupiny není vždy jednoznačné, ve skutečnosti je určení dále ovlivňováno okolními podmínkami, jako je teplota, tlak, frekvence přiloženého napětí nebo intenzita vnějšího elektrického pole. [2, 5]

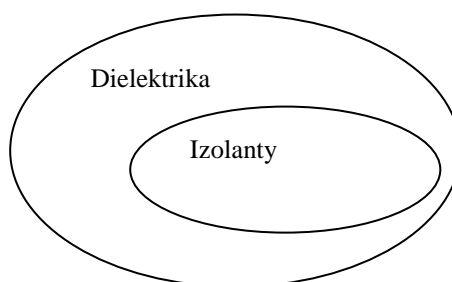
1.2 Dielektrický podsystém

Systémy všech elektrických zařízení tvoří jeden sériový spolehlivostní řetězec skládající se z podsystémů a prvků, které z technologických důvodů obsahují organické komponenty, nejčastěji tvořeny ze syntetických makromolekulárních látek. Jedná se o pevná dielektrika, která jsou nezastupitelnou součástí elektroizolačních systémů, kde dielektrické vlastnosti zvolených materiálů výrazně ovlivňují funkci, životnost a spolehlivost celého elektrického zařízení. [1, 5, 8]

1.2.1 Obecné rozdělení dielektrik

Pro bližší pochopení rozdílu následuje vysvětlení mezi pojmy dielektrikum a izolant. **Dielektrikem** je aktivní prvek, jehož základní vlastností je schopnost polarizovat se v elektrickém poli, resp. látka je schopna vytvořit si vnitřní elektrické pole. To je dosaženo silně vázanými nosiči elektrického náboje. Hlavními parametry polarizační schopnosti je relativní permitivita a ztrátový činitel. Důsledkem polarizace látky je schopnost absorbovat (střádat, jímat) elektrický náboj. V přesném smyslu tohoto slova je v podstatě jedinou praktickou oblastí uplatnění dielektrik výroba kondenzátorů. [1, 4, 5]

Izolant je naproti tomu prvek pasivní, který má za úkol izolovat dvě místa s různým elektrickým potenciálem a zabránit tak průtoku elektrického proudu mezi nimi. Hlavními parametry izolantu jsou izolační odpor a elektrická pevnost. Izolanty řadíme do podskupiny dielektrik. Přestože pojem dielektrikum a izolant spolu úzce souvisí, neplatí zde ekvivalence. Znamená to, že každý izolant je dielektrikum, nikoli však obráceně. Tento jednostranný výrok je schematicky zachycen na obr. 1.2.1. [1, 4, 5]

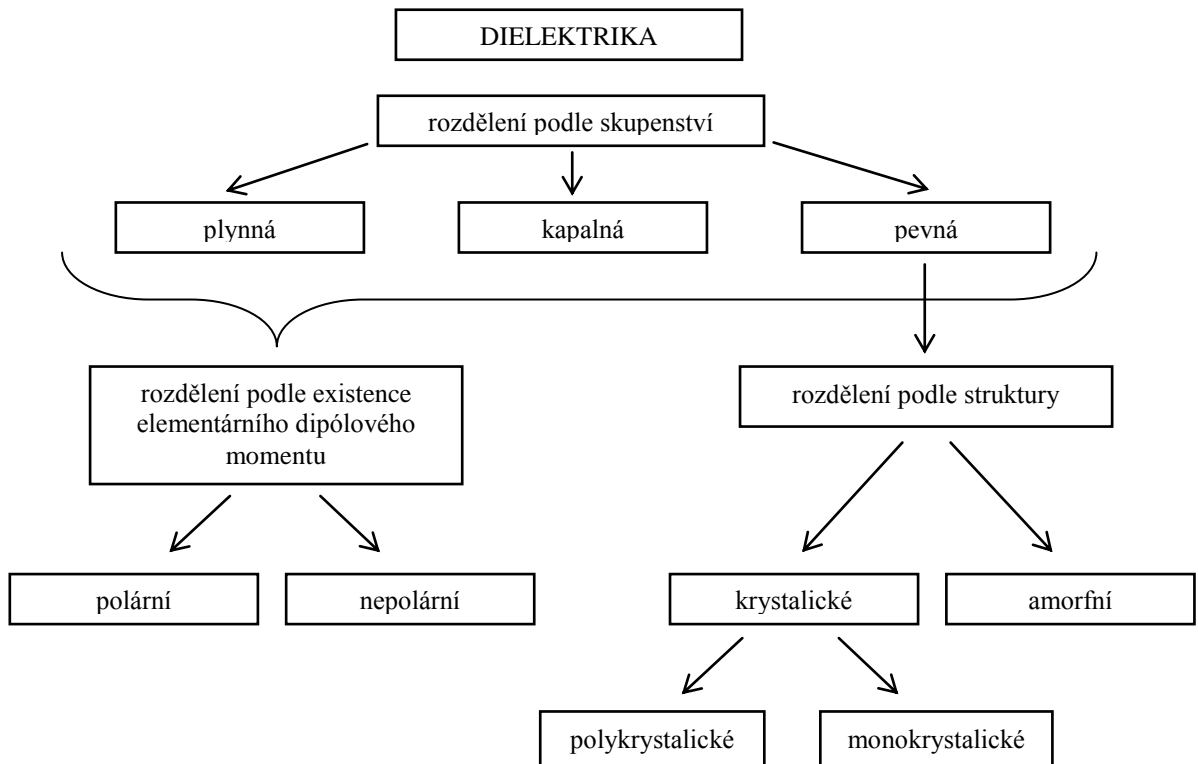


Obr. 1.2.1 Dielektrika a izolanty [5]

1.2.2 Rozdělení dielektrik podle skupenství a struktury

Rozdělení dielektrika podle skupenství je významné z hlediska fyzikálních i elektrických vlastností a také z pohledu náročnosti a proveditelnosti matematických výpočtů jejich vlastností a chování. Dielektrika dělíme podle skupenství, uspořádání a struktury, jak vyplývá z obr. 1.2.2. Celá tato práce se zabývá pevnými dielektriky, jelikož jsou hlavními představiteli izolačních systémů elektrických točivých strojů, a bude jim věnována pozornost i v následujících kapitolách. Tuhá dielektrika zahrnují největší množství látek ze všech dielektrik. Základní rozdělení je na látky organické a anorganické a dále tvoří několik podskupin z hlediska zpracovatelských vlastností. Pevná dielektrika se dále dělí na polární a nepolární. Jestli je látka polární, je určeno přítomností permanentních elementárních dipólových

momentů ve svém objemu. Některé látky tyto dipóly obsahují i bez přítomnosti elektrického pole. Dalším faktorem dělení je podle jejich vnitřní struktury na látky krystalické a amorfní. Látky krystalické se vyznačují středem souměrnosti, u amorfních látek je struktura bez symetrie. Toto rozdělení je rozhodující v případě speciálních dielektrik, jakými jsou piezoelektrika a pyroelektrika. [1, 2, 5]



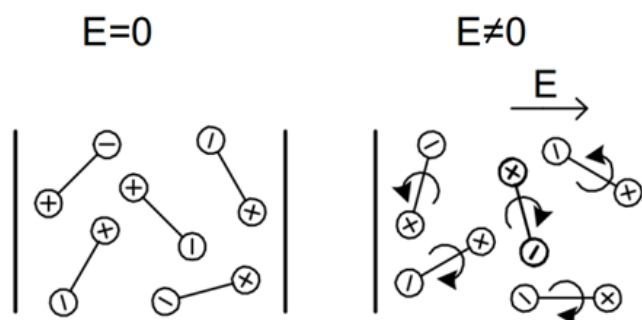
Obr. 1.2.2 Rozdělení dielektrik [5]

1.2.3 Rozdělení dielektrik podle polárnosti

Podle existence dipólového momentu se všechna skupenství dielektrik člení na dva rozdílné druhy látek – polární a nepolární. Tyto látky se vzájemně odlišují stavbou hmoty a tudíž i chováním ve vnějším elektrickém poli. [1, 2, 5]

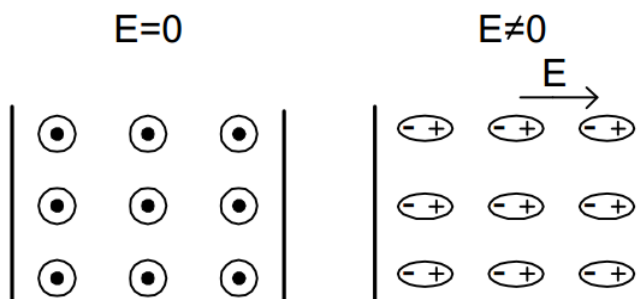
Polární dielektrika obsahují ve své vnitřní struktuře elementární elektrické dipóly. Tyto dipóly částic jsou v látce přítomny permanentně a jsou pevně vázané. Mají neuspořádané rozmístění, ale navzájem se jejich potenciály eliminují a tak navenek se dielektrikum jeví jako elektricky neutrální. Působením vnějšího elektrického pole vznikají kladnými a zápornými konci dipólů točivé momenty, jak je vidět na obr. 1.2.3. Úhel natočení dipólů závisí na

intenzitě elektrického pole a teplotě, která ovlivňuje viskozitu materiálu. Výslednou orientací dipólů vznikne polarizační náboj, který zpětně působí na vnější elektrické pole. [1, 2, 5, 9]



Obr. 1.2.3 Polární dielektrikum [9]

Nepolární dielektrika ve svém objemu permanentní dipóly neobsahují. Proces polarizace se odehrává pouze uvnitř atomu. Bez vnějšího elektrického pole mají záporné a kladné náboje shodné těžiště uprostřed jádra atomu a látka je tak neutrální. Po vložení do elektrického pole dojde k vnitřní polarizaci atomu a elektronový obal se pouze deformuje ve směru působení pole podle obr. 1.2.4. [1, 2, 5, 9]

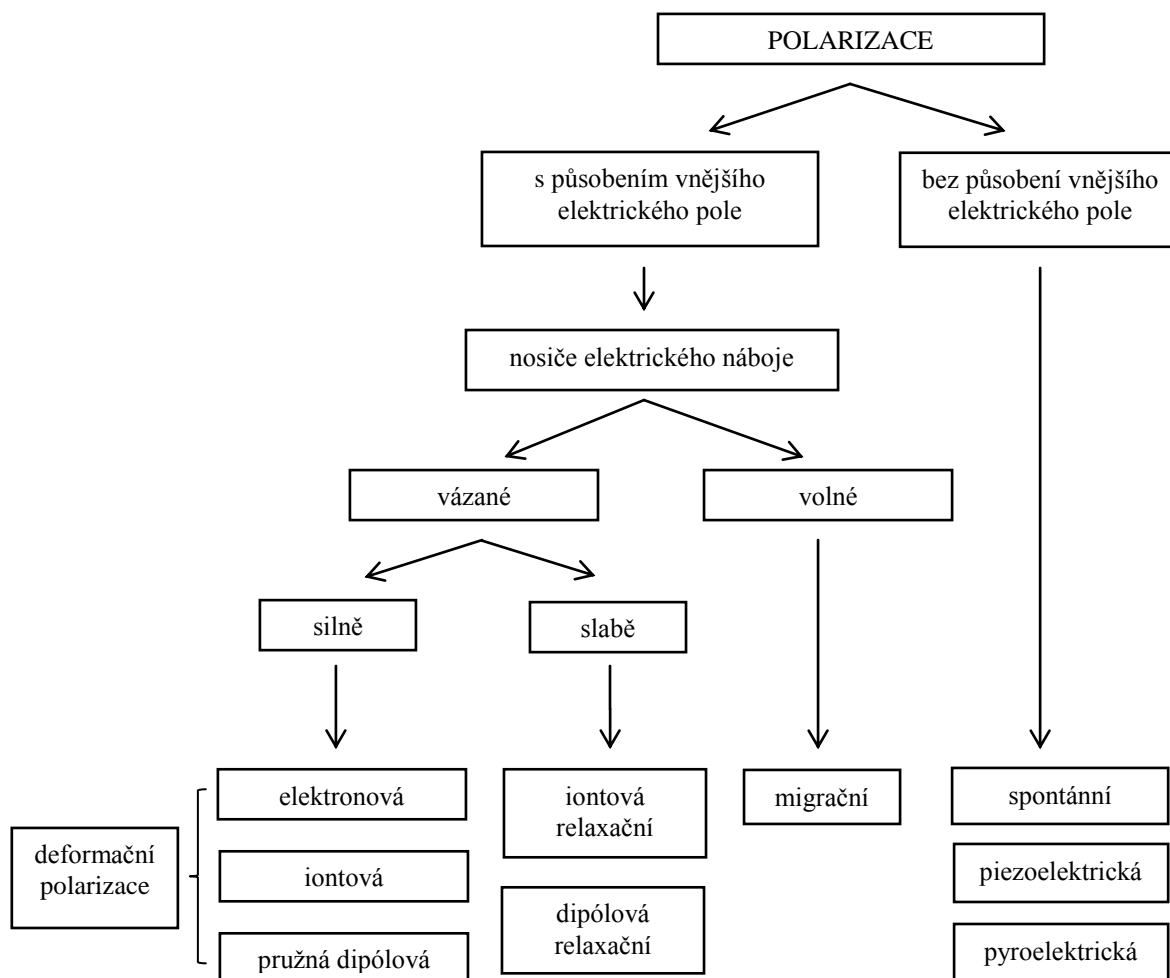


Obr. 1.2.4 Nepolární dielektrikum [9]

1.3 Polarizace dielektrika

Polarizaci objevil roku 1758 Johann Carl Wilcke. Je to fyzikální jev, který charakterizuje změny a děje v dielektriku. Jedná se o přemístění elektricky vázaných nábojů dielektrika z rovnovážných poloh do poloh nových při působení vnějšího elektrického pole a ve zvláštních případech i bez působení vnějšího elektrického pole. A jelikož jsou dielektrika nevodivá, nepohybují se náboje volně, ale dochází pouze k jejich malému lokálnímu posuvu. Na obr. 1.3.1 je k nahlédnutí základní dělení mechanismů polarizace. [2, 5, 6]

Zkoumání polarizačních jevů probíhajících v dielektrikách lze makroskopicky nebo mikroskopicky. V dalších kapitolách se text této bakalářské práce bude věnovat základním mechanismům polarizace. [2, 5]



Obr. 1.3.1 Rozdělení polarizačních mechanismů [5]

1.3.1 Polarizační mechanismy

V dielektrických materiálech s ohledem na strukturu látky a chemické složení se rozlišuje více typů mechanismů polarizací. Každá polarizace se vyznačuje určitou specifičností. V látkách se také často vyskytuje více druhů polarizací najednou, přičemž silnější mechanismus překrývá slabší. [2, 5]

Polarizační mechanismy se projevují ve stejnosměrném i střídavém elektrickém poli a dle typu elektrického náboje a způsobu pohybu existují tři základní skupiny mechanismů: deformační polarizace, relaxační polarizace a migrační polarizace. Podle povahy vazebních sil

nosičů náboje lze skupiny rozdělit na pružné polarizace (deformační polarizace) a nepružné polarizace (relaxační a migrační polarizace), které lze také zkráceně nazývat relaxace. Základní rozdělení polarizačních mechanismů je podle toho, zda k polarizování dojde za přítomnosti vnějšího elektrického pole, či nikoliv. [2, 5]

1.3.1.1 S působením vnějšího elektrického pole

1.3.1.1.1 Deformační polarizace

Deformační polarizace může být:

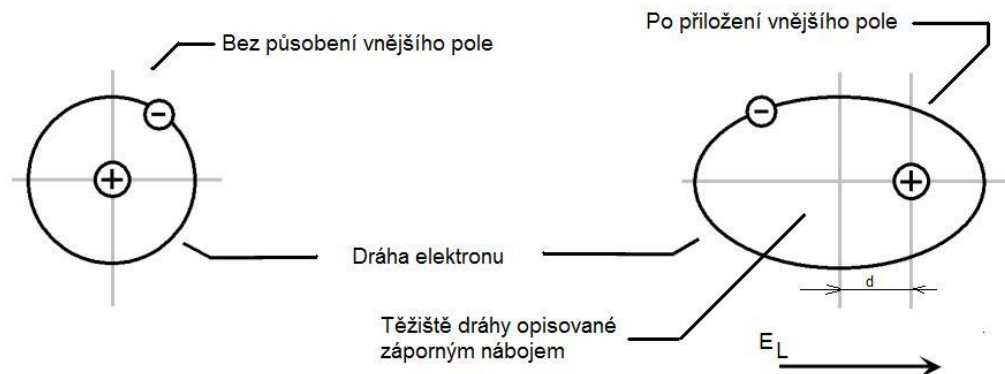
- elektronová
- iontová

Nosičem elektrického náboje u tohoto druhu polarizace bývá obvykle elektron, iont a v některých situacích i stálý dipól. Tato polarizace se také nazývá elastická (rychlá) polarizace díky elastické provázanosti elektrického náboje v rovnovážné poloze elektrostatickými silami. Po odeznění působení vnějšího elektrického pole se náboj, v závislosti na elastičnosti, téměř okamžitě vrátí do své rovnovážné polohy. Velmi rychlá reakce elektrického náboje má za následek, že jsou tyto polarizace frekvenčně nezávislé a bezetrátové. Jelikož jsou nosiče náboje vázány velice silnými vazbami, jsou nezávislé na dalších parametrech, jako je vnější teplota, tlak apod. [2, 5]

Elektronová polarizace

V případě, že na atom nepůsobí vnější elektrické pole, je těžiště kladného náboje (atom) i těžiště záporného náboje (elektronový obal) v jednom bodě. Působením vnějšího elektrického pole na atom začínají působit elektrostatické síly opačného směru a to jak na jádro (kladný náboj) tak i na elektronový obal (záporný náboj). Elektrostatické síly naruší těžiště atomu i elektronového obalu a následně vzniká deformace původního klidového tvaru atomového obalu. Dipól je v tomto případě chápán jako určité vychýlení kladného a záporného náboje v rámci jednoho atomu. Na obr. 1.3.2 je vidět atom vodíku bez působení vnějšího elektrického pole a po přiložení vnějšího elektrického pole. Atom vodíku byl zvolen jako názorný příklad elektronové polarizace, protože se skládá pouze z jednoho protonu a jednoho elektronu. Samotná deformace není nikterak veliká a je dána rozměry atomu. Rychlost ustálení u elektronové polarizace je velmi vysoká a uvádí se v rozmezí od 10^{-16} až 10^{-13} s. K elektronové

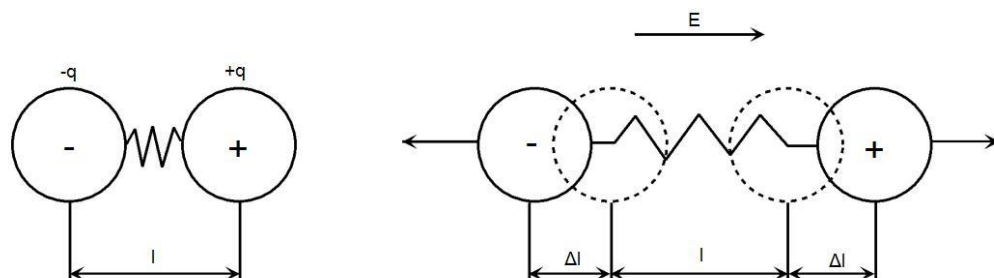
polarizaci dochází u všech látek i skupenství. Její příspěvek na celkové polarizaci je v porovnání s ostatními typy polarizací poměrně malý. [2, 5]



Obr. 1.3.2 Schematické znázornění elektronové polarizace na modelu atomu vodíku [5]

Iontová polarizace

Ionty jsou stavebními prvky iontových krystalů. Samotné ionty mají velice silnou vazbu v krystalové mřížce. Iontová polarizace je charakteristická a rozdílná od elektronové tím, že v ní existují určité dipólové momenty i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Po vložení dané látky do elektrického pole dochází vlivem Lorenzovy síly k pružnému posunutí iontů ve směru orientace pole, jak je uvedeno na obr. 1.3.3. a vytvoří se tak nový indukovaný dipólový moment. Vzhledem k velikosti a hmotnosti dochází k ustálení (návratu) iontů za delší dobu než u elektronů, v rozmezí řádově 10^{-13} až 10^{-12} s. Iontová polarizace je téměř frekvenčně a teplotně nezávislá a bezztrátová, jako polarizace elektronová. [2, 5]



Obr. 1.3.3 Vznik dipólového momentu [5]

1.3.1.1.2 Relaxační polarizace

Existují dva druhy relaxačních polarizací:

- iontová
- dipólová

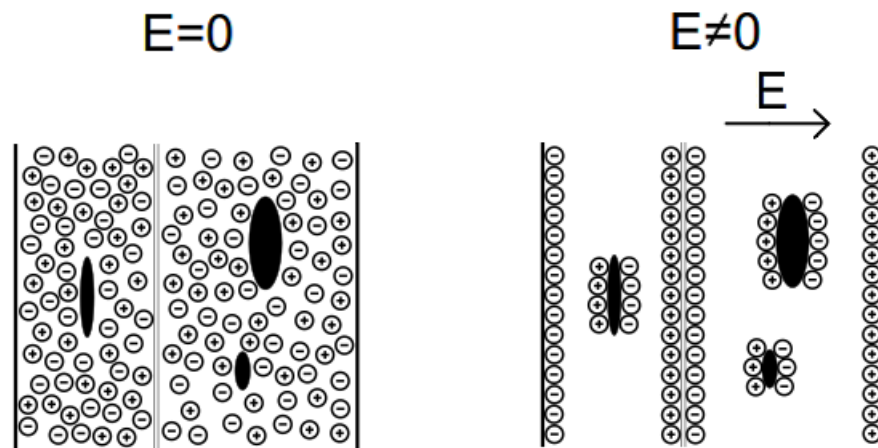
Relaxační polarizace má společného s deformační snad jen to, že bez přítomnosti elektrického pole k polarizaci nedochází. Jinak se liší dobou průběhu, která je značně delší, tak i formou. Při tomto polarizačním mechanismu hraje velkou roli teplota, jelikož možnosti pohyblivosti dipólů jsou velmi závislé na viskozitě média. Proto je také často tato relaxace označována jako tepelná polarizace. Po přiložení elektrického pole se částečně usměrní chaotické tepelné pohyby částic a změní se výška potenciálové bariéry. **Iontová relaxační polarizace** se vyskytuje v látkách skládajících se z iontů nebo skupiny atomů či molekul (např. volné ionty nečistot nebo příměsí) slabě vázaných k sousedním stavebním částicím látky. **Dipólová relaxační polarizace** vzniká v důsledku přeorientování permanentních dipólů molekul s různým charakterem vazeb. Existuje několik druhů dipólových relaxačních polarizací, které bývají v technické literatuře označovány např. jako β -polarizace nebo γ -polarizace. Obě relaxační polarizace jsou způsobeny pohybem pouze určitého druhu dipólů s tím, že γ -polarizace vzniká pohybem dipólů obvykle menších rozměrů než ty, které se podílejí na β -polarizaci. Je možné, že v dielektrické odezvě dielektrika se může projevit více těchto polarizací, které se pak označují např. jako β^* -polarizace. [2, 5, 21, 22]

Hlavní parametr relaxační polarizace je časová konstanta přechodového děje, která se nazývá relaxační doba a značí se symbolem τ . Tento čas bývá v rozmezí 10^{-12} - 10^{-8} s a je potřebný pro ustálení elektrického náboje na nové, energeticky výhodnější, poloze. Tato poloha obvykle bývá ve směru působení elektrického pole, tím vzniká asymetrie a jednotka objemu dielektrika získá dipólový moment. Zásadní rozdíl je také v tom, že tento druh polarizace je ztrátový. [2, 5]

1.3.1.1.3 Maxwell-Wagner-Sillars polarizace

Tato polarizace je také často označována jako mezi vrstevná nebo objemová či polarizace prostorovým nábojem. Uplatňuje se zejména ve vrstvených a kompozitních materiálech. Jedná se o migrační polarizaci dielektrika. Pro její vznik je nutnou podmínkou přítomnost jak vázaných tak i volných nosičů nábojů a makroskopických nehomogenit v dielektriku. Nehomogenitou se rozumí nečistota, bublinka, prasklina a podobné strukturální defekty, které

se vyznačují odlišnou relativní permitivitou a konduktivitou. Nosiče elektrického náboje se po přiložení vnějšího elektrického pole zachytávají částečně na nehomogenitách, neboť každá z nehomogenit vytváří rozhraní dvou oblastí s rozdílným prostředím pro pohyb elektrického náboje. Hromadění volných nosičů na určitém místě pak vytváří určitý prostorový náboj, který se z makroskopického hlediska projeví jako polarizace dielektrika, vzniká Maxwell-Wagner-Sillars polarizace. Ke kumulaci pohybujících se volných nosičů elektrického náboje dochází samozřejmě i na rozhraní dvou typů dielektrik s rozdílnými vlastnostmi (obr. 1.3.4). Ve srovnání s předešlými polarizacemi je Maxwell-Wagner-Sillars nejpomalejší a stejně jako polarizace relaxační je ztrátová. Doba ustálení se pohybuje v závislosti na struktuře, teplotě okolního prostředí a dalších vlivů přibližně v intervalu 10^{-5} - 10^4 s. [2, 5, 23, 24]



Obr. 1.3.4 Vznik prostorového náboje v nehomogenním dielektriku [5]

1.3.1.2 Bez působení vnějšího elektrického pole

- spontánní
- piezoelektrická
- pyroelektrická

Spontánní polarizace se vyskytuje v pravidelně uspořádaných krystalech, jako jsou např. elektrety. Tento druh dielektrik se vyznačuje tím, že je schopný udržet ve svém okolí stálé elektrické pole. Nutnost pro vznik spontánní polarizace je přítomnost tepla a současně i elektrického pole, či světla. Nutno dodat fakt, že s rostoucí teplotou spontánní polarizace klesá a při dosažení Curieovy teploty úplně vymizí.[2, 5]

1.3.2 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

Chování dielektrik závisí na druhu pole, ve kterém se dielektrikum nachází. Existuje stejnosměrné a střídavé pole. Popisovat děj při působení střídavého pole je značně komplikovanější než v elektrostatickém poli, s tím souvisí i náročnější matematické vyjádření. Díky setrvačnosti způsobené kinetickou vlastností částic (volné a vázané náboje), které sledují změnu polarity působícího pole (předpokládáme sinusový průběh napětí), dochází při změně polarity k fázovému zpoždění vektoru elektrické indukce \vec{D} za vektorem intenzity elektrického pole \vec{E} . Toto zpoždění se nazývá ztrátový úhel δ . Tyto vektory můžeme vyjádřit pomocí symbolicko-komplexní metody. [2, 5]

Nejprve je potřeba provést následující přiřazení: [5]

$$\vec{D}(t) \rightarrow \vec{D}_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)}, \quad (1.3.1)$$

$$\vec{E}(t) \rightarrow \vec{E}_m \cdot e^{j\omega t}, \quad (1.3.2)$$

kde \vec{D}_m a \vec{E}_m jsou amplitudy jednotlivých vektorů a ω je úhlová rychlost vycházející z frekvence f vnějšího elektrického pole a vypočítaná podle vztahu:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1.3.3)$$

Dále platí vztah mezi elektrickou indukcí $\vec{D}(t)$ a intenzitou elektrického pole $\vec{E}(t)$ definovaný následovně:

$$\vec{D}_m \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot \vec{E}_m \quad (1.3.4)$$

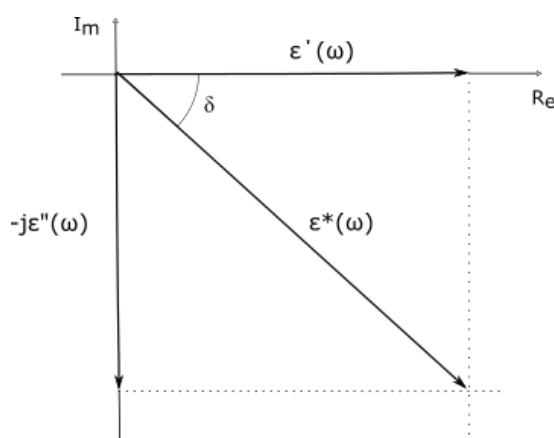
V případě dielektrika ve střídavém elektrickém poli je nutné si vyjádřit frekvenčně závislou komplexní relativní permitivitu ε^* , která vyjadřuje reálné chování dielektrika v elektrickém poli. Komplexní permitivita se uvádí vztahem: [2, 5]

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (1.3.5)$$

kde $\varepsilon'(\omega)$ je reálná část komplexní permitivity (relativní permitivita) a $\varepsilon''(\omega)$ je imaginární část komplexní permitivity (ztrátové číslo).

Lze tedy konstatovat, že reálná složka komplexní permitivity je mírou kapacitního charakteru dielektrika (stejný význam jako ε_r v poli stejnosměrném) a imaginární složka komplexní permitivity je mírou ztrát vzniklých v dielektriku namáháním střídavým elektrickým polem. Reálná složka komplexní permitivity se postupně zvyšuje s rostoucí teplotou a klesá s rostoucí frekvencí. Imaginární složka komplexní permitivity se zvětšuje nebo zmenšuje s rostoucí teplotou nebo frekvencí, v závislosti na výskytu a charakteru relaxačních procesů. [2, 5]

Grafické vyjádření vztahu reálné a imaginární složky komplexní permitivity je zachyceno na následujícím obrázku (obr. 1.3.5). Zobrazovaná představa se týká polárních dielektrik. V případě nepolárních dielektrik se o komplexní permitivitu nejedná, jelikož ty postrádají imaginární složku. [5]



Obr. 1.3.5 Grafické vyjádření komplexní permitivity [5]

Úhel δ charakterizuje míru ztrát v dielektriku (energie přeměněná v teplo) a poměrem imaginární a reálné složky komplexní permitivity si můžeme vyjádřit ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. V ideálním dielektriku se obě hodnoty blíží k nule. [2, 5]

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (1.3.6)$$

V následující experimentální části této práce jsou reálné a imaginární složky permitivity polymerních vzorků porovnány navzájem. Pro stanovení komplexní permitivity materiálů se

složitou strukturou (např. polymerů) se nejčastěji používá Havriliak-Negami (HN) rovnice. Výpočet komplexní permitivity v celé oblasti je dán následující rovnicí. [5]

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon^*(j\omega)_\sigma + \varepsilon^*(j\omega)_{R.P.} \quad (1.3.7)$$

První část HN rovnice (1.3.8) se zabývá výpočty komplexní permitivity relaxačních procesů a další (1.3.9) se zabývá výpočtem vodivostní složky komplexní permitivity. [5]

$$\varepsilon^*(j\omega)_{R.P.} = \sum_{k=1}^n \left[\varepsilon_{\infty k} + \frac{\varepsilon_{sk} - \varepsilon_{\infty k}}{[1 + (j\omega\tau_k)^{\alpha_k}]^{\beta_k}} \right] \quad (1.3.8)$$

$\varepsilon^*(j\omega)_{R.P.}$ je celková komplexní permitivita vyplývající ze všech relaxačních procesů v materiálu od nulové frekvence až k teoreticky nekonečné frekvenci. Existují k až n procesů v materiálu. ω je úhlová frekvence. ε_{sk} je maximální a $\varepsilon_{\infty k}$ minimální hodnota relativní permitivity relaxací. Parametry α_k a β_k jsou parametry tvaru relaxační křivky. Parametr α_k charakterizuje šířku a parametr β_k asymetrii křivek. τ_k určuje dobu trvání relaxace. [5]

$$\varepsilon^*(j\omega)_\sigma = -i \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right)^N \quad (1.3.9)$$

$\varepsilon^*(j\omega)_\sigma$ je celková komplexní permitivita platná pro vodivou složku. σ_0 je vodivost. ε_0 je permitivita vakua a N je exponenciální faktor, který ve většině případů je roven 1. [5]

1.4 Elektrická vodivost dielektrik

V praxi se bohužel nelze setkat s ideálním dielektrikem. Ideální dielektrikum nevlastní žádné volné nosiče elektrického náboje a je bez příměsí a znečištění. V reálných aplikacích se však využívá dielektrikum, které má nenulovou elektrickou vodivost. Pro posouzení vhodnosti materiálu z hlediska elektrické vodivosti nám slouží fyzikální veličiny, které se nazývají rezistivita ρ a konduktivita γ . Obě veličiny jsou měrnými ukazateli, tedy, že je hodnota přepočítána na jednotku objemu sledovaného materiálu. Tím je docíleno, že je možné

jednotlivé materiály mezi sebou porovnávat. Vztah mezi měrnou elektrickou vodivostí a měrným elektrickým odporem je následující: [1, 2, 5]

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (1.4.1)$$

kde γ je měrná elektrická vodivost ($S \cdot m^{-1}$)
 ρ je měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot m$)

Pro plochý vzorek při předpokladu homogenního elektrického pole lze vyjádřit měrný elektrický odpor: [2, 5]

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h}, \quad (1.4.2)$$

kde R je hodnota izolačního elektrického odporu (Ω)
 S je plocha elektrod (m^2)
 h je tloušťka vzorku (m)

Izolační odpor R , který je součástí předchozí rovnice, je možné získat jednoduchým výpočtem: [2, 5]

$$R = \frac{U}{I}, \quad (1.4.3)$$

kde U je stejnosměrné napětí přiložené na elektrody měřeného dielektrika (V)
 I je stejnosměrný proud procházející dielektrikem (A)

Elektrická vodivost se také rozděluje podle typu nosiče na elektronovou, děrovou, protonovou, iontovou a elektroforetickou. V případě elektronové, děrové, protonové a iontové vodivosti je elektrický náboj přenášen prostřednictvím elementárních částic nebo iontů. U elektroforetické vodivosti se náboj přenáší většími skupinami částic. Vznik a pohyb volných

nosičů náboje je silně ovlivněn vzájemnými vzdálenostmi částic. Jednotlivá skupenství (pevné, kapalné, plynné) mají tuto vzdálenost velmi rozdílnou. [1, 2, 5]

Vzhledem k zaměření této bakalářské práce se další kapitoly věnují elektrické vodivosti pouze v pevných izolantech.

1.4.1 Elektrická vodivost pevných izolantů

Mechanismus vodivosti v pevných látkách je velice obtížné důsledně popsat, jelikož pevná dielektrika zahrnují široké spektrum různých látek a obsahují velké množství nehomogenit. Konduktivita pevných izolantů je za normálních podmínek velmi malá. Za abnormální podmínky považujeme působení silných elektrických polí na pevný izolant a vysoké teploty. Pro pevné izolanty je specifická elektronová a iontová vodivost, přičemž jedna z nich vždy převládá. Elektronová vodivost se projevuje velmi zřídka a to až při hodnotách intenzity elektrického pole $10^1 - 10^2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. V ostatních, normálních případech u velké většiny izolantů a dielektrik převládá iontový charakter vodivosti. [1, 2, 5]

Pro popis pohyblivosti iontu, který vznikl disociací neutrální molekuly, slouží zjednodušený vztah, který je odvozen na základě modelu dvojité potenciálové jámy [5]:

$$b = \frac{f_0 \cdot q \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} \cdot e^{-\frac{W}{kT}}, \quad (1.4.4)$$

- kde b je pohyblivost iontu ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)
 f_0 je frekvence vlastních tepelných kmitů okolo rovnovážných poloh (Hz)
 q je náboj iontu (C)
 k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)
 T je termodynamická teplota (K)
 W je výška potenciálové bariéry, která odděluje obě rovnovážné polohy ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)

Následně pohyblivost iontu b je možné dosadit do vztahu pro konduktivitu γ :

$$\gamma = n \cdot q \cdot b, \quad (1.4.5)$$

kde n je koncentrace volných nosičů náboje (iontů) (m^{-3})

Tento teoretický vztah počítá, že se všechny ionty v látkách s iontovými vazbami podílí bezprostředně na elektrické vodivosti. Avšak v praxi tomu tak úplně není. [1, 5]

Pro další úvahy o elektrické vodivosti pevných izolantů se tyto látky rozdělují na následující tři skupiny: [5]

- iontové krystalické látky
- anorganické amorfnní látky
- organické amorfnní látky

Iontové krystalické látky se vyznačují pravidelnou strukturou uspořádaných kladných a záporných iontů v uzlech krystalické mřížky. V ideálních krystalech jsou ionty pevně připoutané a jejich pohyb je nemožný. [5]

Ve skutečnosti ale reálné krystaly vykazují určitou elektrickou vodivost. Ta je způsobena přítomností nečistot a defekty v krystalové mřížce tzv. Frenkelovou poruchou, nebo defekty ve struktuře nazývanou Schottkyho poruchou. V takovýchto případech vznikají ve struktuře volné intersticiální ionty nebo volná místa tzv. vakance, které se následně stávají nosiči elektrického náboje. Zmíněná konduktivita je tak způsobena pohybem iontů a rozhodujícím faktorem je teplota krystalu a intenzita elektrického pole. [5]

Anorganické amorfnní látky reprezentují především materiály různých druhů skel. Elektrickou vodivost způsobuje pohyb slabě vázaných iontů v závislosti na velikosti vnějšího elektrického pole. Mechanismus pohybu je podobný jako u látek kapalných. Hodnota konduktivity se pohybuje v rozsahu 10^{-3} až 10^{-17} $S \cdot m^{-1}$. Především křemičité (SiO_2) a borité (B_2O_3) skla se vyznačují nejmenší elektrickou vodivostí. Stejně jako v předchozím případě je konduktivita závislá na okolní teplotě. [5]

Představiteli **organických amorfnních látek** jsou zejména syntetické makromolekulární látky. Vyznačují se extrémně nízkou konduktivitou, která je u běžně používaných polymerních materiálů (PE, PET, PEN, PVC...) nižší než 10^{-17} $S \cdot m^{-1}$. Celkově se jedná o rozmanitý soubor materiálů, a proto nelze elektrickou vodivost jednoduše popsat všeobecně. Předpokládá se, že konduktivita má opět iontový charakter v závislosti na stupni polárnosti a čistotě polymerů. Stejně jako v předchozích případech elektrickou vodivost ovlivňuje teplota a intenzita elektrického pole. Kromě toho jsou izolační vlastnosti polymerních izolantů citlivé na přítomnost vody. [2, 5]

1.4.2 Povrchová vodivost pevných izolačních materiálů

Až doposud byla řeč jen o vnitřní měrné elektrické vodivosti, avšak v případě pevných izolačních materiálů je nezbytné brát v potaz i povrchovou elektrickou vodivost. „Měrná povrchová elektrická vodivost je definována na základě proudu tekoucího po povrchu izolantu I_p a intenzity elektrického pole E následujícím vztahem:“ [5]

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E}, \quad (1.4.6)$$

kde I_p je proud, který teče po povrchu izolantu, připadající na jednotku délky elektrody.

Na obrázku 1.4.1 je znázorněné prostorové uspořádání proudu tekoucího na povrchu pevného izolantu. V tomto případě lze definiční vztah dále upravit [5]:

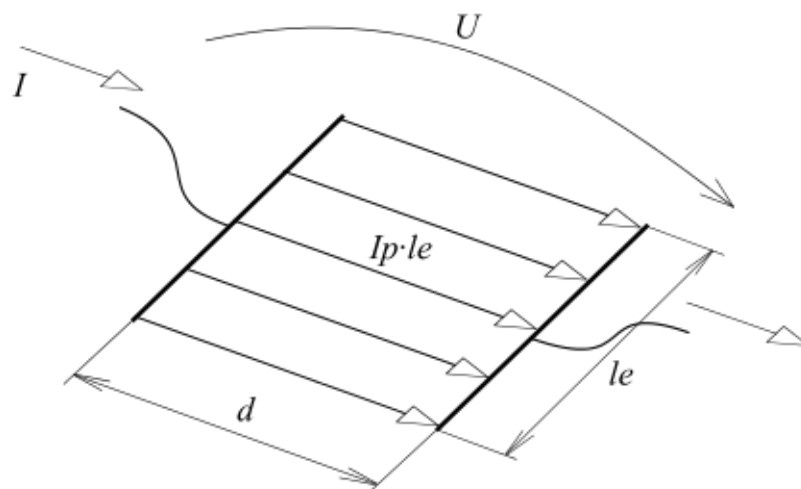
$$\gamma_p = \frac{I}{l_e} \cdot \frac{d}{U} = \frac{I}{U} \cdot \frac{d}{l_e}, \quad (1.4.7)$$

kde I je celkový proud tekoucí po povrchu izolantu (A)

U je napětí na elektrodách (V)

d je vzdálenost mezi elektrodami (m)

l_e je délka elektrod povrchu elektrod (m)



Obr. 1.4.1 Proud tekoucí po povrchu izolantu [5]

„Ze vztahu (1.4.7) vyplývá, že i povrchovou elektrickou vodivost lze hodnotit na základě měrného povrchového elektrického odporu:“ [5]

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{l_e}{d}, \quad (1.4.8)$$

kde R_p je povrchový elektrický odpor naměřený mezi elektrodami (Ω)

Povrchová elektrická vodivost vzniká pohybem volných nosičů náboje po povrchu izolantu. Velikost povrchové elektrické vodivosti je přímo úměrné disociací molekul nečistot nacházejících se na povrchu a relativní vlhkosti. Tenká vrstva absorbované vody na povrchu materiálu podporuje zmíněnou disociaci přítomných nečistot. Nejvýrazněji nám usazenou vlhkost ovlivňují látky polární, které svojí přitažlivou silou překonají síly v molekulách vody. Zástupci takovýchto materiálů jsou např. anorganická skla, u kterých je dokonce vodivost povrchová větší než vodivost vnitřní. [1, 5]

1.5 Dielektrické ztráty

Jestliže je dielektrikum zatíženo elektrickým polem, v jeho struktuře se začnou odehrávat děje, kdy určitá část způsobí přeměnu elektrické energie na tepelnou a z pohledu elektroizolační techniky nežádoucí energii. Takto přeměněná energie se nazývá dielektrické ztráty. Jedná se o důležitou vlastnost dielektrik a rozhodující z hlediska jejich použití. Na tento nežádoucí proces se nesmí opominout při konstrukci a provozu strojů. Důležité je navrhnout dostatečné chlazení a zajistit odvod teplot tak, aby nedocházelo k nárůstu teploty, degradaci zejména u organických materiálů a následné destrukci izolačního systému. [1, 5]

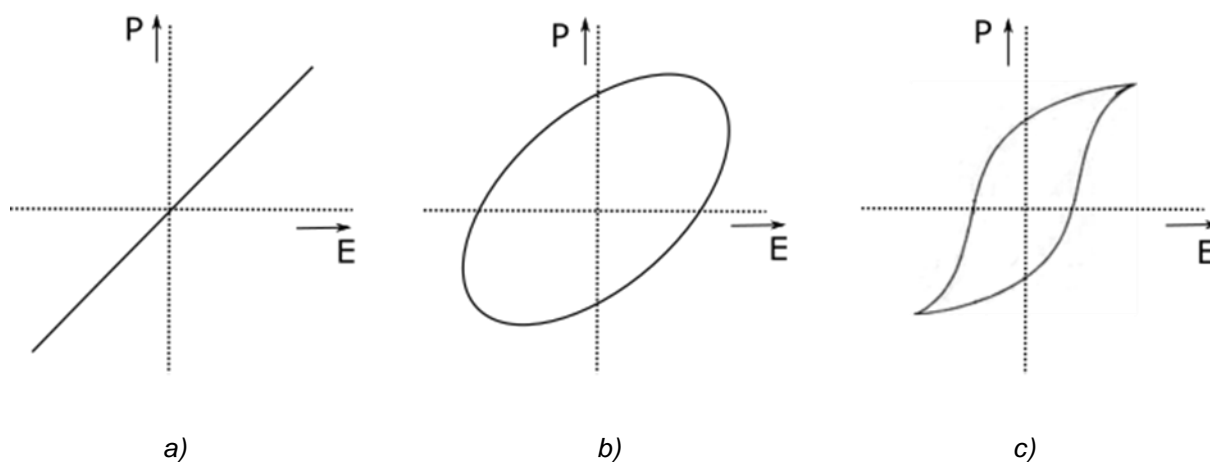
1.5.1 Druhy dielektrických ztrát

Mechanismus vzniku dielektrických ztrát závisí na druhu látky a jejím složení. Příčinou dielektrických ztrát jsou pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje, které jsou obsažené ve struktuře každého izolantu. Ztracená energie je ovlivněna elektrickou vodivostí izolantů a některými druhy polarizací. U pevných materiálů taktéž do dielektrických ztrát zahrnujeme ionizační ztráty způsobené částečnými výboji v nehomogenitách dielektrika. [5]

Příčinou vodivostních ztrát je vznik vodivostního proudu, který prochází dielektrikem nebo teče po jeho povrchu. Aplikovatelnost daného dielektrika v praxi závisí na velikosti hodnoty jeho konduktivity. [5]

Polarizační ztráty vznikají tím, jak vnější elektrické pole překonává a usměrňuje chaotický pohyb částic, čímž se vázané nosiče elektrického proudu opožďují za změnami pole vnějšího. Vznikají tak ztráty způsobené iontovou nebo dipólovou relaxační (nepružnou) polarizací. Dalším polarizačním dějem jsou ztráty migrační polarizací, při které dochází k tvorbě prostorového náboje. Při této polarizaci jsou ztráty energie závislé jak na pohybu tohoto prostorového náboje, tak na volných nebo velmi slabě vázaných nosičů elektrického náboje. Ve všech případech pro velikosti ztrát hraje rozhodující roli teplota dielektrika a frekvence vnějšího elektrického pole. [5]

Z pohledu velikosti jednotlivých polarizačních dějů, jako mírou se podílejí na celkových dielektrických ztrátách během jedné periody působícího střídavého elektrického pole, rozlišujeme tři druhy závislostí. U dielektrik v nichž se vyskytuje pouze pružná polarizace, ke ztrátám polarizací nedochází a závislost velikosti vektoru polarizace na intenzitě vnějšího elektrického pole je lineární, jak je uvedeno na obr. 1.5.1a. Pokud se v materiálu vyskytuje navíc relaxační polarizace, vznikají ztráty a výsledná závislost má tvar elipsy (obr. 1.5.1b). Pro feroelektrické materiály platí závislost s viditelnou hysterezí (obr. 1.5.1c). Pro uvedené závislosti platí přímá úměra mezi plochou ohraničená smyčkou a velikostí ztracené energie, přeměněné v teplo. [5, 6]



Obr. 1.5.1 Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole [5]

1.5.2 Ztráty podle druhu působícího napětí

K dielektrickým ztrátám dochází v materiálu, při působení elektrického pole s jakýmkoli průběhem stejnosměrného či střídavého napětí. [1, 5]

Při působení stejnosměrného elektrického napětí na dielektrikum, je rozhodujícím faktorem velikost izolačního odporu a velikost procházejícího vodivostního proudu. Při průchodu vodivostního proudu dielektrikem vznikají Jouleovy ztráty. Mohou se uplatnit i ztráty ionizační, ale ty jsou v porovnání s vodivostními ztrátami nevýznamné. Ztracený výkon v izolantu můžeme spočítat podle vztahu: [1, 5]

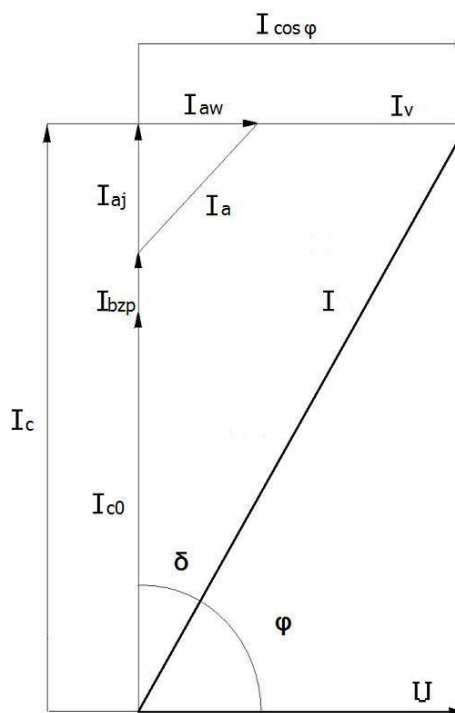
$$P_{zss} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (1.5.1)$$

kde R_i je izolační odpor dielektrika (Ω)

I je hodnota procházejícího proudu (A)

U je napětí přiloženého na vzorek (V)

V případě střídavého elektrického napětí je velikost dielektrických ztrát mnohem vyšší než v poli stejnosměrném. Důvodem toho je skutečnost, že vedle vodivostních ztrát se zde uplatňují ztráty polarizační a mnohdy výrazněji i ionizační ztráty. Při výpočtu dielektrických ztrát se předpokládá sinusový průběh střídavého elektrického pole bez rušivých procesů, jako jsou částečné výboje. Při působení střídavého pole dochází uvnitř dielektrika ke zpoždění časového průběhu elektrické indukce za intenzitou elektrického pole. Toto zpoždění se označuje jako ztrátový úhel δ a udává velikost ztrát, které se v dielektriku přemění na teplo. Vzniklý jev je stejné frekvence jako přiložené napětí a proud protékající dielektrikem. Proud je možné rozložit do složek, jak znázorňuje fázorový diagram na obr. 1.5.2. [1, 5, 6]



Obr. 1.5.2 Fázorový diagram reálného dielektrika [5]

Na základě fázorového diagramu lze ztracený výkon v dielektriku vyjádřit podle vztahů:

$$P_{Z.stř} = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \sin \delta = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.5.2)$$

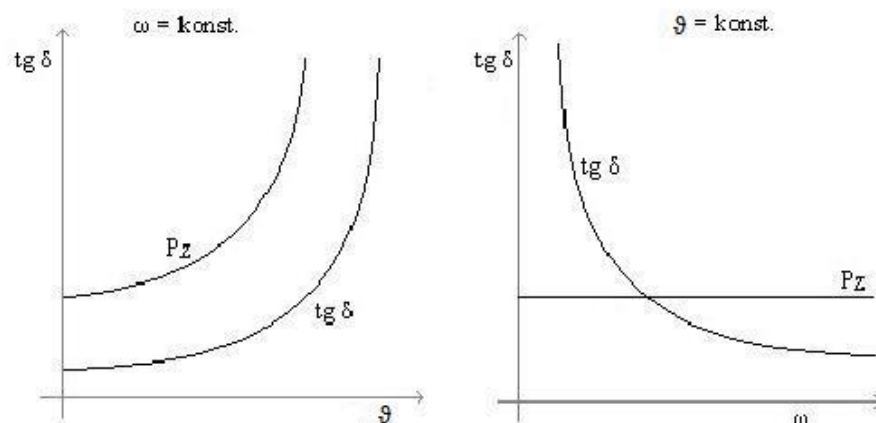
kde celkový proud I reálného dielektrika je složený z nabíjecího proudu geometrické kapacity I_{c0} , proudu bezztrátových pružných polarizací I_{bjp} , absorpčním proudem I_a , který odpovídá ztrátovým nepružným polarizacím a vodivostní složky I_v , odpovídající prosakujícímu proudu. [5, 6]

1.5.3 Ztráty v pevných izolantech

V pevných dielektrikách se mohou obecně objevit ztráty vodivostní, polarizační i ionizační. Dielektrické ztráty se odvíjí od chemického složení materiálu, respektive druhu a původu nečistot obsažených ve struktuře. Popis chování pevných izolantů z hlediska dielektrických ztrát se provádí podle skupin s charakteristickou polarizací. [1, 5]

U nepolárních pevných izolantů se uplatňují bezztrátové pružné polarizace a tím se uplatňují prakticky pouze ztráty vodivostní. Do této skupiny patří také látky s nepatrným dipólovým momentem, například organické polymery. Pro tento druh materiálů to znamená

velmi malé dielektrické ztráty a jsou tak vhodné pro použití i ve vysokofrekvenční oblasti. Na obr. 1.5.3 je zobrazená závislost ztrátového činitele na teplotě a kmitočtu působícího elektrického pole. Charakteristika teplotní závislosti odpovídá pouze elektrické vodivosti, průběh $\text{tg } \delta$ je hyperbolický a je patrné, že ztrátový výkon P_z je nezávislý na frekvenci. [5]

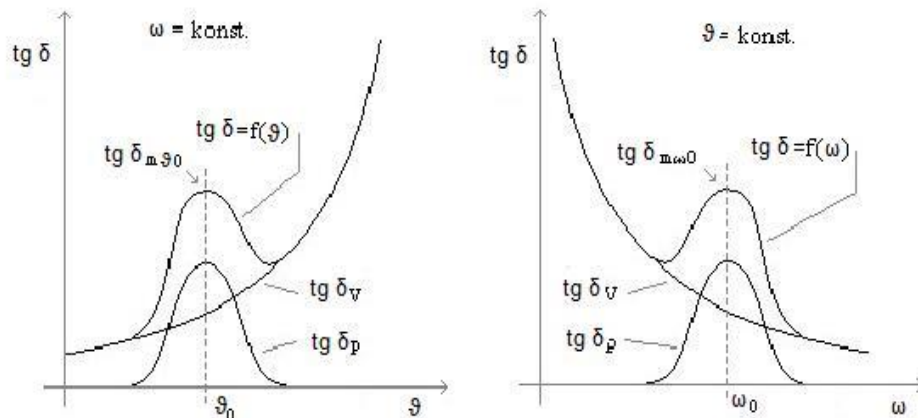


Obr. 1.5.3 Teplotní a frekvenční charakteristika $\text{tg } \delta$ nepolárních pevných izolačních materiálů [5]

Další skupinou jsou iontové izolanty, tvoří je krystalické nebo amorfni anorganické látky. Krystalické izolanty mohou být složeny z těsně nebo netěsně uloženými ionty. V případě materiálů s těsně uloženými částicemi se vyskytují bezztrátové polarizace a ve střídavém elektrickém poli se chovají jako nepolární látky. Jsou to materiály například slída, křemen nebo korund. U iontových izolantů s těsným uložením částic se uplatňuje pružná i iontová relaxační polarizace, to znamená dielektrické ztráty s vodivostní i polarizační složkou. Velikost ztrátové energie závisí na množství poruch v krystalové mřížce. Elektrickými vlastnostmi se podobají iontovým amorfni izolantům, které reprezentují dielektrické ztráty mající obě ztrátové složky. Z izolačních materiálů to jsou zejména anorganické skla. Patří sem také keramické izolanty, u kterých velikost ztrát závisí na poměru krystalické a amorfni fáze, ale zpravidla se vyznačují malými dielektrickými ztrátami. [5]

U polárních pevných izolačních materiálů se na rozdíl od nepolárních projevuje i ztrátová dipólová polarizace. Dielektrické ztráty mají tak složky vodivostní a polarizační. V případě výskytu nehomogenit v materiálu se na ztrátách může podílet i složka ionizační. Materiály v této skupině patří k nejčastěji používaným. V technické praxi se jedná o přírodní nebo syntetické makromolekulární látky. Charakteristika na obr. 1.5.4 ukazuje teplotní a frekvenční závislost ztrátového činitele polárních izolačních materiálů. Výsledná charakteristika vzniká složením dvou

průběhů odpovídající vodivostním a polarizačním ztrátám. Exponenciální průběh $\text{tg } \delta_v$ odpovídá vodivostní složce a polarizační složka $\text{tg } \delta_p$ ukazuje maximum v závislosti na teplotě a tvar má podle distribuční funkce. Velikost vrcholu křivky $\text{tg } \delta_p$ závisí na interakcích dipólových momentů a kolísání relaxačních dob. [5]



Obr. 1.5.4 Teplotní a frekvenční charakteristika $\text{tg } \delta$ polárních pevných izolačních materiálů [5]

1.5.4 Ztráty v heterogenních izolantech

Předchozí kapitola o dielektrických ztrátách v pevných materiálech vycházela z předpokladu homogenní struktury. V reálné praxi se však setkáme převážně s dielektriky více či méně nehomogenními. O tom jak hodně nehomogenní materiál to bude, rozhoduje proces výroby i vliv provozního namáhání. Dále záleží na zpracování daného izolantu, používají se vrstvené a kompozitní materiály. Jak již bylo popsáno v kapitole o migrační polarizaci, dochází ke zvětšení dielektrických ztrát vytvářením prostorových nábojů v bublinkách vyplněných plynem a od určité úrovně elektrického namáhání dochází ke vzniku částečných výbojů – ionizačních ztrát. Z pohledu této problematiky je silně rozhodující vhodná volba materiálů, správná výrobní technologie a důsledné dodržování postupu výroby. [5]

1.6 Izolační systémy elektrických strojů

Izolační systémy elektrických strojů tvoří složitá soustava dielektrických materiálů oddělující dvě místa s různým potenciálem. Jeden potenciál představují vodiče vinutých fází a druhý potenciál je tvořen konstrukcí a všemi uzemněnými částmi stroje. Na elektroizolační materiály při provozu elektrického zařízení působí mnoho nepříznivých faktorů, jako jsou například velikost napětí, provozní teplota, prostředí nebo frekvence. Z důvodu neustálého vývoje moderních technologií, zejména zrychlování spínacích součástí pro řízení výkonů,

jsou kladeny velmi vysoké požadavky na elektroizolační materiály, které svojí funkcí musí zajistit vysokou spolehlivost a životnost celého elektrického zařízení. Požadovaným parametrům pro tento druh elektrického zařízení vyhovují nejlépe vrstvené a kompozitní izolační materiály. [5, 8]

1.6.1 Kompozitní materiály v izolačních systémech elektrických strojů

Pojem kompozitní materiály, zkráceně kompozity, vychází z podstaty heterogenních materiálů, složené ze dvou a více vrstev chemicky a fyzikálně odlišných složek, které se vzájemně liší svými mechanickými, dielektrickými a tepelnými vlastnostmi. Spojením těchto fází vzniká materiál nových multifunkčních vlastností. Výsledné vlastnosti materiálu jsou dány kombinací vlastností jednotlivých složek, jejich objemovým podílem a technologií vyztužení. Finální výrobek pak využívá synergických účinků různorodých materiálů a dosahuje mnohem lepších elektroizolačních, mechanických a tepelných vlastností, než kterými disponuje jakýkoli druh materiálu samostatně. Kompozity, díky svým unikátním vlastnostem, jsou v elektrotechnice využívány v hlavních izolacích elektrických točivých strojů, v izolačních systémech transformátorů a při výrobě ohnivzdorných pásek pro ovíjení speciálních kabelů. Mimo tuto oblast také tvoří neméně významnou skupinu strojírenských materiálů široce používanou pro konstrukční účely. [4, 7]

V elektrotechnickém průmyslu kompozitní materiály využívají především vynikajících dielektrických a izolačních vlastností polymerů, které svými parametry splňují nejvyšší požadavky na izolační systémy, jakými jsou: vysoká elektrická pevnost, co nejvyšší rezistivita, co nejnižší relativní permitivita a velmi nízké dielektrické ztráty. [5, 7]

V energetice typickým využitím vrstvených a kompozitních materiálů najdeme v izolačních systémech elektrických točivých strojů, které si můžeme rozdělit podle pracovního napětí následovně:

- nízkonapěťové
- vysokonapěťové

Nízkonapěťové systémy jsou tvořeny izolací vodičů, izolací drážek a impregnanty. Izolování vodičů je provedeno podle úrovně pracovního napětí a účelu použití. To je dosaženo kombinací pevné a nanášené izolace v podobě laků, ovinutím bavlnou, skelnými vlákny a dalšími materiály. Vyložení drážek se provádí z důvodu zvýšení ochrany vodičů

vinutí před mechanickým poškozením o stěnu drážky. Pro drážkovou izolaci jsou používány kombinované materiály, drážkové lepenky a vícevrstvé ohebné materiály jako například Nomex. Impregnuje se pomocí roztoků laků různého složení s technikou nanášení obvykle máčením, zaplavováním nebo zakapáváním. [5]

Vysokonapěťové systémy se izolují dvěma rozdílnými způsoby využívající elektroizolační materiál tvořený tříložkovým izolačním systémem. Jedná se o techniku označovanou jako resin-rich, v literatuře nazývanou „již obsahující pryskyřici“ a techniku s názvem VPI, což je technologie vakuově tlaková impregnace. U resin-rich technologie probíhá ovin předmětu kompozitní páskou kontinuálním nebo diskontinuálním způsobem, následuje vytvrzování na předepsané rozměry, po odplynění navazuje tepelné vytvrzování izolace ve formách a důležitým závěrečným průběhem je pozvolné vychlazování. Naproti tomu VPI je náročnější technologií vyžadující nákladnější technické vybavení. Využívají se odlišně připravené kompozitní pásy. Rozdílnost výrobní operace spočívá v impregnačním procesu, kdy ovinuté vodiče se přenesou do impregnačního zařízení (vakuotěsný kotel), následuje dlouhé sušení, zavedení vakua, zaplavení vinutí teplým impregnantem, vytvrzování a závěrečná fáze je podobná, pomalé vychladnutí. U obou technik tvoří jádro použitého kompozitu rozsáhlá skupina materiálů sestávající z podkladového materiálu, pojiva a rekonstruované slídy. Podle zvolené technologie se používají předimpregnované polotovary tak zvané prepregy nebo polovytvrzené pásy v tak zvaném B stavu. [5, 7]

Obecně metody výroby kompozitních materiálů zahrnují konvenční mechanické mísení a lisování směsí vybraných složek, ale přesná technika zpracování a chemická receptura je tajemstvím každého výrobce. V případě tříložkového materiálu výsledná struktura vzniká spojením daných fází, které se jednotlivě nazývají: výztuž, matrice a plnivo. [4, 5, 7]

Výztuž je tužší a pevnější nespojitá nosná složka, kterou v různých vazbách a profilech tvoří skleněná tkanina, papír, bavlněná tkanina nebo polyamidová, polyesterová, PEN, PET fólie. Úkolem nosné složky v kompozitním materiálu je především zajistit mechanické i elektrické vlastnosti a má klíčový vliv na výsledné vlastnosti profilu. Výhodou termoplastických folií je zejména možnost výroby v nižších tloušťkách než u skleněné tkaniny. Nevýhodou plastů je nižší teplotní odolnost než v případě skleněné tkaniny. [4, 5, 7]

Pojivo výztuže nazýváme **matrice** a tvoří spojitou a obvykle poddanější část. Úlohou matrice v kompozitním materiálu je dokonale prosytit systém nosné složky, vytvořit tvarově stálý výrobek a zajistit tak přenos sil a ochranu vláken výztuže. Druh materiálu použitého

v matici určuje další dielektrické vlastnosti, zejména tepelnou a chemickou odolnost. Používají se nejčastěji epoxidové, polyesterové, vinylesterové nebo silikonové pryskyřice. [4, 5, 7]

Funkci **plniva** zastává v elektroizolační technice rekonstruovaná slída, která svým obsahem zásadně posiluje izolační vlastnosti výsledného produktu. Podle druhu výrobní operace se volí v použití kalcinovaný nebo nekalcinovaný slídový papír. [4, 5, 7]

1.6.2 Klasifikace materiálů v elektroizolačních systémech

Provozní schopnost elektrického zařízení závisí na podmínkách, ve kterých stroj pracuje. Mezi nejvýznamnější faktory, které mají vliv na stárnutí izolace, patří prozní teplota. V případě teplotní degradace materiálu dochází k delaminaci mezi jednotlivými vrstvami izolace stroje, vznikají mezery, ztrácí se mechanická pevnost, mění se fyzikální a funkční vlastnosti materiálu. V mezerách následně mohou vznikat částečné výboje. Proto teplota byla určena klíčovým ukazatelem, podle kterého se provádí třídění pevných dielektrik a klasifikace elektroizolačních materiálů. Označení elektroizolačních materiálů (EIM) a elektroizolačních systémů (EIS) je provedeno ve stupních Celsia podle maximální teploty použití, pro které je materiál vhodný. Teplotní odolnost a zařazení EIM/EIS do příslušné teplotní třídy určuje norma ČSN EN 60085. Tabulka 1 uvádí klasifikaci izolačních materiálů podle relativního indexu odolnosti (RTE). Relativní index odolnosti je číselná hodnota teploty, při které má materiál uspokojivé vlastnosti po předpokládanou dobu provozování ve srovnání se standardním (známým) materiálem. Doba života se s ohledem na normu obvykle volí na 20 000 hodin. Při překračování dovolené teploty, pro kterou je materiál určen, se délka životnosti exponenciálně zkracuje. [1, 5, 8]

Tab. 1.6.1 Teplotní klasifikace izolačních materiálů [5, 8]

Relativní index teplotní odolnosti RTE [°C]	Teplotní třída [°C]	Předchozí označení
< 90	70	
90 - 105	90	Y
105 - 120	105	A
120 - 130	120	E
130 - 155	130	B
155 - 180	155	F
180 - 200	180	H
200 - 220	200	
220 - 250	220	
> 250	250	

1.6.3 Diagnostika izolačních systémů

Dielektrický podsystém svojí povahou chápeme jako nejdůležitější část elektrických strojů a celého elektrického systému tvořící jeden celek počínaje výrobou elektrické energie, její distribucí a následného využití koncovými uživateli. Základním předpokladem celé elektrické soustavy je dlouhověkost a spolehlivost takového systému. Zásadním aspektem při navrhování strojů je správný výběr a použití vhodného materiálu, který vychází z požadavků na minimalizaci nákladů z hlediska rozměrů a hmotnosti, využití maximální účinnosti zařízení, minimalizace nežádoucích ztrát a v neposlední řadě i vlivu na životní prostředí. [5, 8]

Pro zajištění bezchybného provozu zmíněných zařízení je tedy žádoucí co největší úroveň poznání dějů odehrávajících se v materiálech při interakcích s výrobou a následnými provozními vlivy. Strukturální přístup k fyzikálním a chemickým vlastnostem materiálů nám zajišťuje disciplína nazývaná – diagnostika. Současná diagnostika je pojata jako progresivní a moderní věda. Tématem této práce je dielektrická spektroskopie pevných izolantů. Jedná se o jednu z diagnostických metod vhodných k dielektrické analýze a způsobů zjišťování stavu izolace elektrotechnických zařízení. [5, 8]

2 Měření vybraných dielektrických parametrů

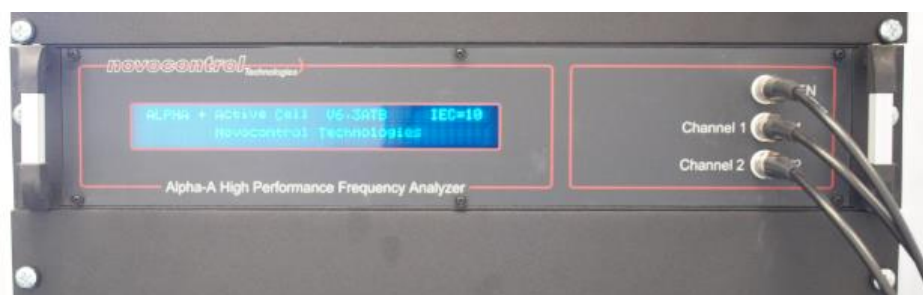
Tato experimentální část se zabývá porovnáváním vybraných dielektrických parametrů polymerních vzorků PET a PEN pomocí metody dielektrické spektroskopie. Dielektrická spektroskopie je diagnostická metoda, která je vhodná pro sledování a prověřování dielektrických vlastností elektroizolačních materiálů. Tato diagnostická metoda je nedestruktivní a je založena na zkoumání dielektrické odezvy pohybujících se nosičů elektrického náboje v dielektrickém materiálu. Pohyb částic závisí na změnách vnějšího elektrického pole a teplotě okolního prostředí. Předmětem této práce bylo vyhodnocení závislosti reálné a imaginární složky komplexní permitivity dielektrických materiálů na frekvenci a teplotě. [10, 11]

2.1 Popis měřených materiálů

Pro měření byly použity vzorky polyetylentereftalátové (PET) a polyetylenaftalátové (PEN) fólie. V současné době je PET považován za nejvýznamnější termoplastický polyester, který je vhodný pro výrobu vláken, fólií, balíků, lahví a pro použití ve formě kompozitních izolačních materiálů. Z hlediska principů chemické polymerizace patří mezi polykondenzáty kvůli jeho polykondenzační produkci kyseliny tereftalátové a etylenglykolu [12]. PEN je termoplastický polyester patřící do stejné skupiny polykondenzátů, který je vyráběn polykondenzací naftalenu kyseliny dikarboxylové a etylenglykolu. Jeho fyzikální vlastnosti jsou lepší ve srovnání s PET, ale zároveň se jedná o dražší materiál. [13]

2.2 Popis měření a vybavení pro měření

Reálné a imaginární složky komplexní permitivity byly hodnoceny podle jejich změn ve střídavém poli s efektivní hodnotou napětí 1 V, ve frekvenčním pásmu od 50 MHz do 1 MHz a v teplotním rozsahu od -50 °C do 160 °C. Pro měření byly použity vzorky rozměru čtverce (35 x 35 mm) s průměrnou tloušťkou 0,023 mm (PET fólie) a 0,025 mm (PEN fólie). Tloušťka vzorků z hlediska statistické významnosti byla měřena pětkrát na pěti různých místech. Pro každý materiál byly změřeny tři vzorky zkoumaných veličin a aritmetickým výpočtem byla získána průměrná hodnota pro příslušný materiál. Měření bylo provedeno pomocí frekvenčního analyzátoru Alpha-A (Novocontrol) (obr. 2.2.1) [14], součástí analyzátoru byl elektrodový systém ZGS (Novocontrol) (obr. 2.2.2) [15] a systém Quatro Cryosystem (Novocontrol) (obr. 2.2.4) [16]. Celkové uspořádání přístrojů předpokládá obr. 2.2.3. Frekvenční analyzátor Alpha-A byl připojen k počítači, který sloužil pro záznam naměřených údajů.



Obr. 2.2.1 Frekvenční analyzátor Alpha-A (Novocontrol)



a)



b)

Obr. 2.2.2 Pohled na elektrodový systém ZGS (Novacontrol) a) v celku, b) v detailu



a)



b)

Obr. 2.2.3 Celkový pohled na rozmístění přístrojů a) bez vloženého elektrodového systému ZGS v kryostatu, b) s vloženým elektrodovým systémem ZGS v kryostatu



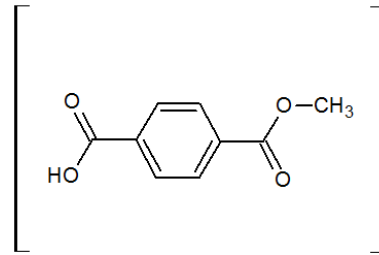
Obr. 2.2.4 Pohled na systém Quatro Cryosystem (Novocontrol)

2.3 Vyhodnocení získaných dat

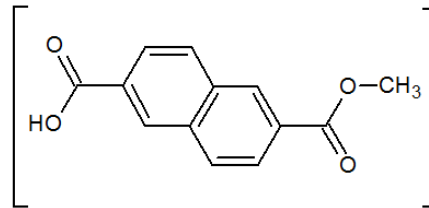
Pomocí metody dielektrické spektroskopie byla provedena měření reálné a imaginární složky komplexní permitivity vzorků PET a PEN. Metoda je založena na sledování reakcí polarizace částic způsobené frekvenční změnou vnějšího elektrického pole a teploty. V uvedeném frekvenčním a teplotním rozsahu byly pozorovány různé relaxační procesy a vodivostní složka. Tyto procesy jsou popsány v literatuře jako M.W.S., β , β^* , γ a vodivostní složka jako σ . Relaxační procesy jsou způsobeny buď pohybem specifické molekulární skupiny nebo skupinami (například β a β^*). Pohyby řetězců představují rotace nebo torzní kroucení krystalických částí doprovázeny posuny podél osy řetězce nebo pohyby lomů apod. Vodivostní složka je způsobena migrací volných nosičů náboje, které jsou vždy součástí každého materiálu. Její podíl klesá s rostoucí frekvencí a stoupá s rostoucí teplotou. Vodivostní složka a všechny dříve zmíněné relaxační procesy způsobují ztráty. Tyto ztráty jsou uvolňovány v podobě tepla. Největší ztráty jsou způsobeny vodivostní složkou. Je třeba poukázat na to, že jak iontová tak elektronová polarizace se účastní ve všech zmíněných relaxačních procesech. [8, 17]

Pro účely vyhodnocení dat jsou relaxační procesy a vodivostní složka popsány z matematického a chemického úhlu pohledu. Z matematického hlediska jsou relaxační procesy a vodivostní složka obecně stanoveny pomocí komplexní permitivity. Reálná a imaginární složka komplexní permitivity vzorků PET a PEN jsou porovnány navzájem a z chemického hlediska jsou studovány zejména relaxační procesy.

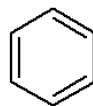
Struktury hlavních makromolekulárních řetězců měřených PET a PEN fólií jsou podobné. Chemická struktura fólie PET je uvedena na obrázku 2.3.1 a fólie PEN na obrázku 2.3.2. Hlavním rozdílem je přítomnost fenylové skupiny (fenylové jádro) v řetězci PET, ve srovnání s naftalenovou skupinou (naftalenové jádro) v řetězci PEN. Fenylové jádro je zobrazeno na obrázku 2.3.3 a), naftalenové jádro na obrázku 2.3.3 b). [18]



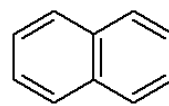
Obr. 2.3.1 Chemická struktura PET fólie



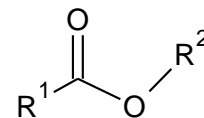
Obr. 2.3.2 Chemická struktura PEN fólie



a)



b)



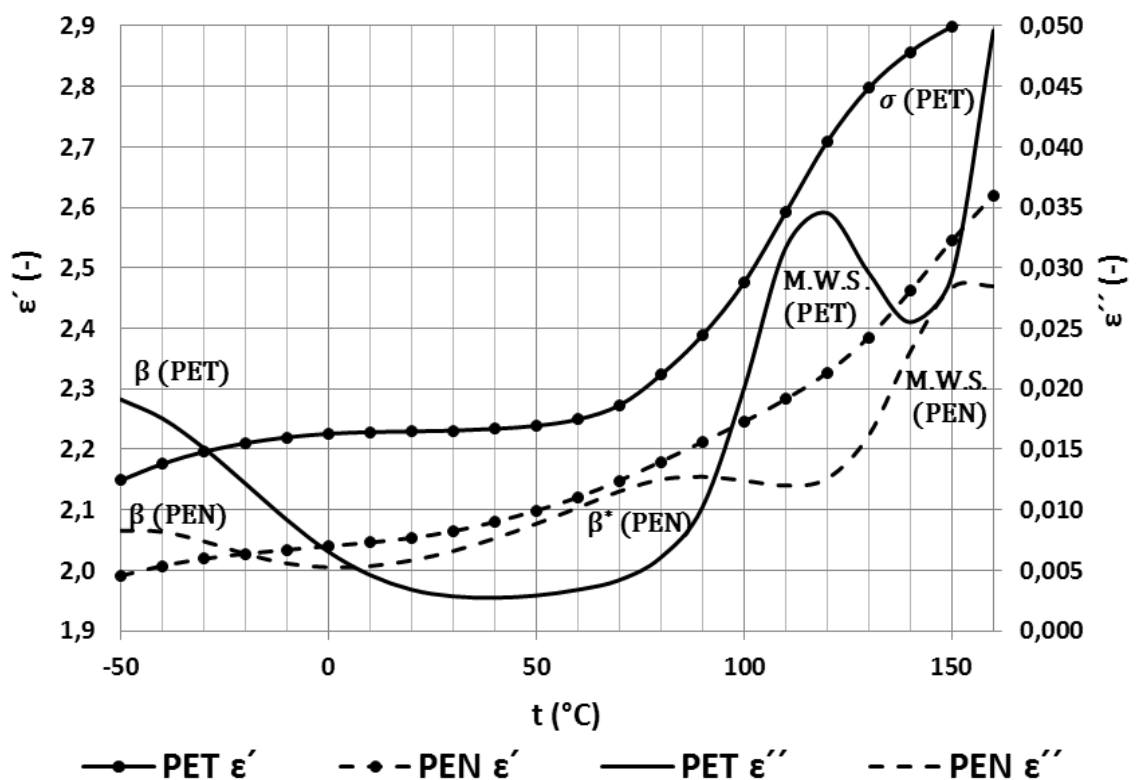
c)

Obr. 2.3.3 Chemická struktura: a) fenylyl, b) naftalen, c) ester

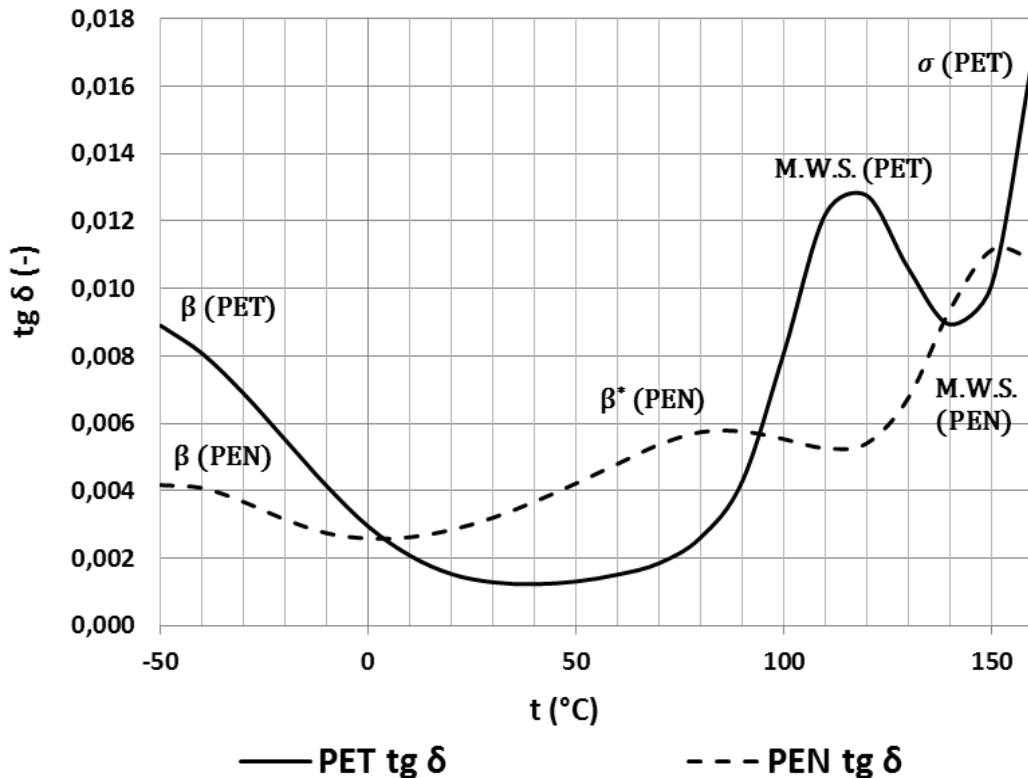
Tento rozdíl podstatně ovlivňuje chování materiálu ve vnějším elektrickém poli, kde naftalenová skupina přispívá k vyšší tuhosti celého makromolekulárního řetězce polymeru a jeho polarizace je výrazně nižší než fenylové skupiny. Tento rozdíl z pohledu polarizace způsobuje, že PET fólie vykazuje vyšší hodnoty reálné složky komplexní permitivity než PEN fólie v rámci celého rozsahu měření. [18]

Obrázek 2.3.4 znázorňuje průběh závislosti reálné a imaginární složky komplexní permitivity PET a PEN fólií na teplotě při průmyslové frekvenci 50 Hz. V tomto diagramu jsou označeny místa výskytu relaxačních procesů (β^* , β), Maxwell-Wagner-Sillars polarizace

(M.W.S.) a vodivostní složky (σ). Jak již bylo uvedeno, relaxační procesy a vodivostní složka způsobují tepelné ztráty a tyto ztráty jsou reprezentovány imaginární složkou komplexní permitivity (ϵ''). PET fólie ukazuje β -polarizaci v rozmezí od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ v uvedeném teplotním rozsahu a frekvenci 50 Hz. Přesný vrchol této polarizace nemůže být uveden v tomto rozsahu, jelikož se nachází pod teplotou $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Následující M.W.S. polarizace se nachází v rozmezí teplot od $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Její vrchol leží na teplotě $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vodivostní složku lze pozorovat přibližně od teploty $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. β -polarizaci u PEN fólie lze považovat v rozmezí od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ani vrchol této relaxace nelze určit přesně, neboť se také vyskytuje pod teplotou $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. β^* -polarizace navazující na β -polarizaci leží mezi teplotami $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vrchol β^* -polarizace se nachází při teplotě $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Následně po β^* -polarizaci můžeme pozorovat M.W.S. polarizaci (od $110\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vrchol lze nalézt přibližně na teplotě $155\text{ }^{\circ}\text{C}$. Začátek vodivostní složky nemůže být uveden v tomto měřeném teplotním rozsahu. V oblasti zkoumaných teplot a jak vyplývá z obr. 2.3.4, u PEN fólie jsou patrné tři relaxační procesy (M.W.S., β^* , β), zatímco PET fólie ukazuje jen dvě (M.W.S., β). [17, 18, 19]



Obr. 2.3.4 Závislost reálné a imaginární složky komplexní permitivity PET a PEN fólie na teplotě při frekvenci 50 Hz



Obr. 2.3.5 Závislost ztrátového činitele PET a PEN fólie na teplotě při frekvenci 50 Hz

β -polarizace je obecně způsobena pohybem určitého typu skupiny molekul (nebo skupin) v řetězci, který je spojen se ztrátami, jak bylo uvedeno. U PET fólie je to pravděpodobně způsobeno pohybem esterových skupin, s částečnou pomocí pohybu fenylové skupiny. U fólie PEN je zdrojem relaxačních procesů pohyb esterové skupiny, s částečnou pomocí pohybu naftalenové skupiny. Ester je znázorněn na obr. 2.3.3 c). Jak je patrné z grafu (obr. 2.3.4) hodnoty imaginární složky komplexní permitivity ukazují skutečnost, že ztráty PET fólie na této relaxaci jsou dvakrát tak vysoké než ztráty PEN fólie. Tento rozdíl je způsoben nižší polarizací naftalenové skupiny ve srovnání s fenylovou skupinou. Konce hydroxylových řetězců (-OH) a methylenové jednotky (CH₃) se pravděpodobně neúčastní β -polarizací PET ani PEN fólie. [17, 19, 20]

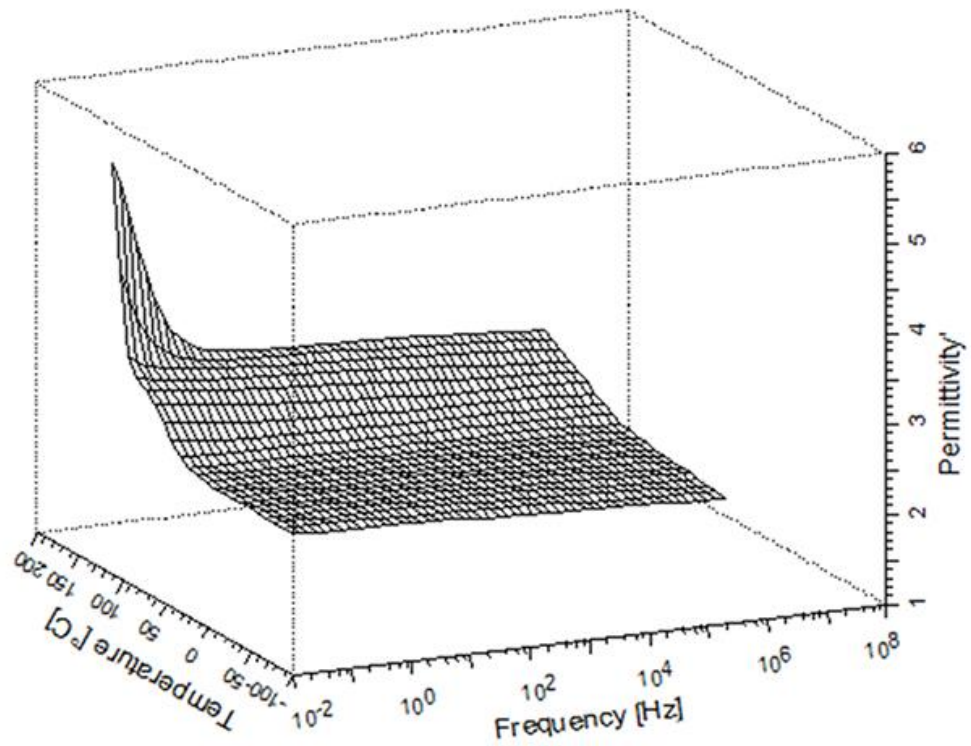
β^* -polarizace je také obecně způsobena pohybem určitého typu skupiny molekuly (nebo skupin) v řetězci, které způsobují také ztráty. U PEN fólie je mechanismus relaxace pravděpodobně způsoben pohybem naftalenové skupiny. Tuto β^* -polarizaci lze pozorovat pouze u PEN fólie, jelikož v PET fólii neexistuje žádná naftalenová skupina a fenylová skupina nezpůsobuje tento druh relaxace. Konce hydroxylových řetězců a methylenových jednotek se pravděpodobně neúčastní β^* -polarizace. [18]

Maxwell-Wagner-Sillars polarizace (M.W.S.) vzniká zachycením migrujících volných nosičů elektrického náboje na nehomogenitách v materiálu, např. vzduchové bublinky, příměsi nebo nečistoty, které se v pevných dielektrikách vyskytují. Nejvyšší hodnotu této relaxace představuje vrchol na teplotě 120 °C pro PET fólii a 155 °C pro PEN fólii. Jak vychází z grafů najevo (obr. 2.3.4 nebo obr. 2.3.5), ztráty PET fólie v této relaxaci jsou vždy vyšší než u PEN fólie, díky nižší polarizaci naftalenové skupiny ve srovnání s fenylovou skupinou. Obrázky (obr. 2.3.4 a 2.3.5) dále ukazují, že M.W.S. polarizace se projevuje u PET fólie při nižších teplotách než u PEN fólie. To je způsobeno celkovou vyšší tuhostí řetězce fólie PEN (díky naftalenové skupině), což vede k jeho vyšší tepelné stabilitě. [18]

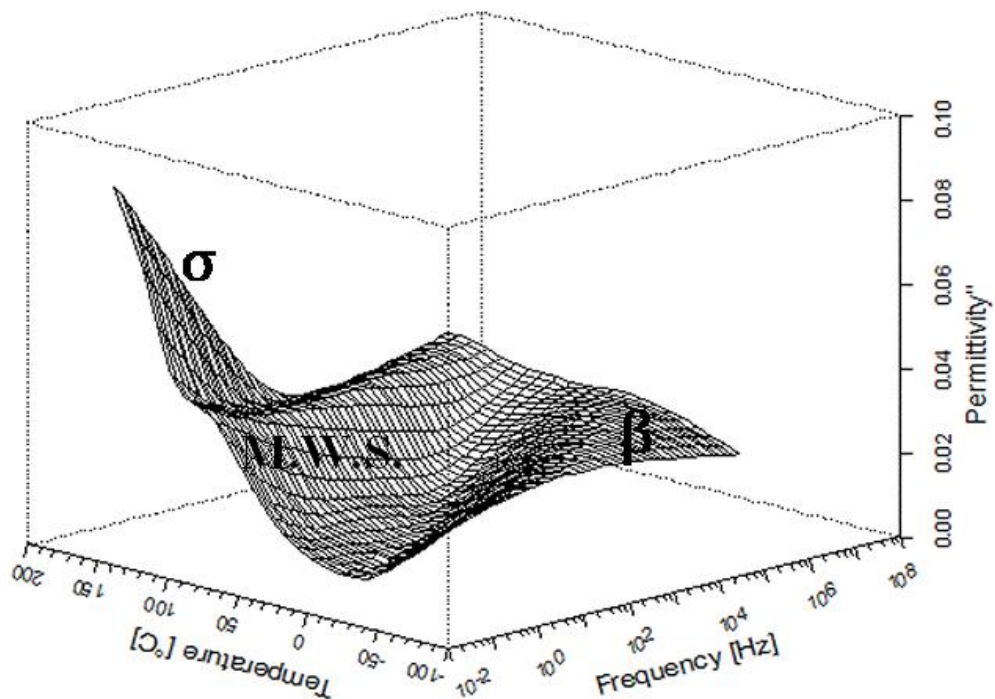
Vodivostní složka σ je způsobena migrací volných nosičů náboje (např. elektronů a iontů), které jsou vždy přítomny v materiálu před začátkem měření nebo se dostanou do materiálu z připojených elektrod. Tato složka je trvale přítomna a klesá s rostoucí frekvencí a zase roste se zvyšující teplotou. [5]

Na základě dosažených výsledků (viz obr. 2.3.4 a 2.3.5) a z hlediska tepelných ztrát lze předpokládat, že pro frekvenci 50 Hz a při teplotě v rozmezí přibližně od 20 °C do 95 °C je výhodnější použití PET fólie, kde jsou ztráty nižší. Na druhé straně pro teploty pod 20 °C a nad 95 °C je vhodnější použít fólii PEN z důvodu nižších dielektrických ztrát. Nicméně rozhodnutí o jejich využití je však ovlivněna také jinými hledisky, např. podle mechanických nebo tepelných vlastností (ty jsou u PEN fólie lepší).

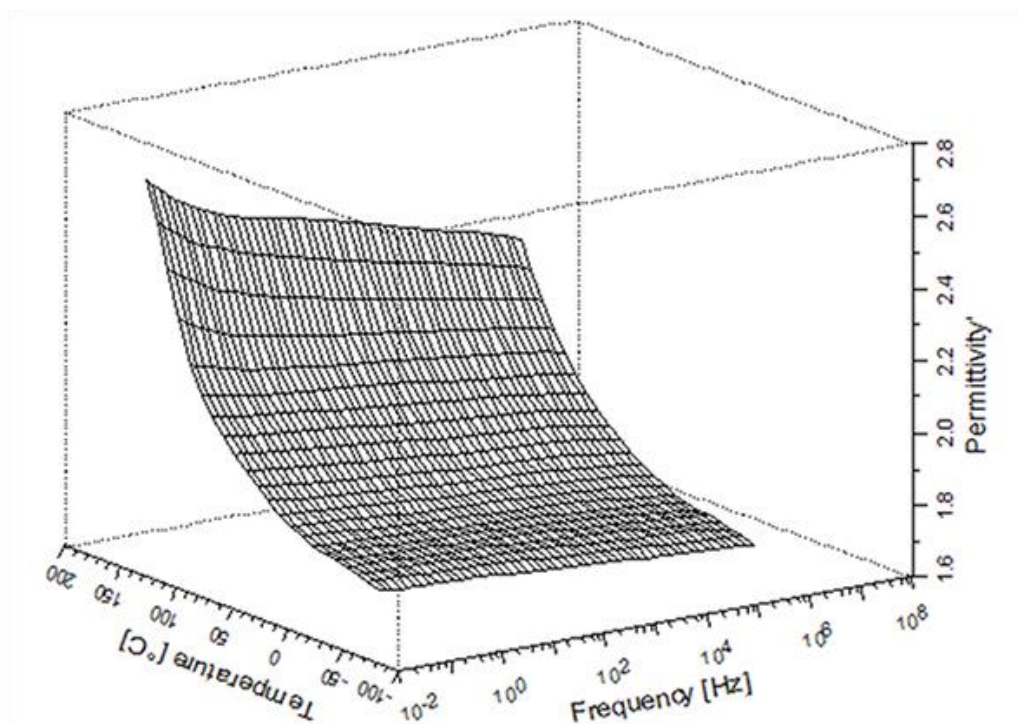
Obrázky 2.3.6 až 2.3.9 ukazují křivky závislosti reálné a imaginární složky komplexní permitivity fólií PET a PEN v celé oblasti naměřených hodnot teploty a kmitočtu. Jednotlivé pozorované relaxační zóny (M.W.S., β , β^*) a vodivostní složka (σ) jsou v diagramech označeny. Mechanismy všech relaxačních procesů a vodivostní složky jsou stejné jako v obr. 2.3.4 a naměřené křivky odpovídají všem uvedeným teoretickým předpokladům.



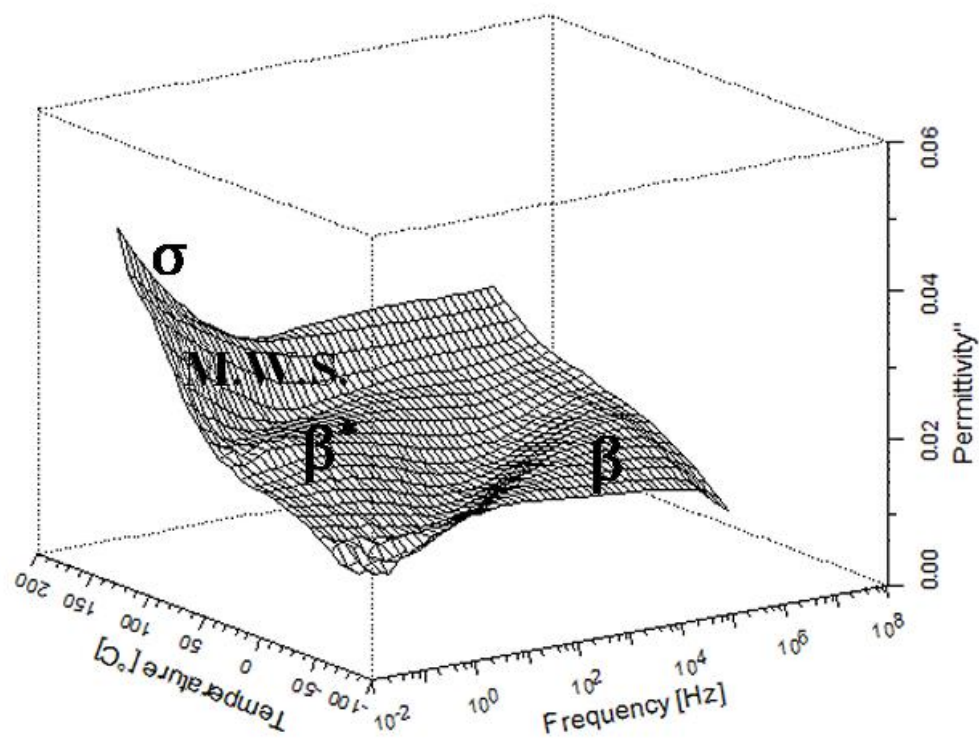
Obr. 2.3.6 Závislost reálné složky komplexní permitivity PET fólie na teplotě a frekvenci



Obr. 2.3.7 Závislost imaginární složky komplexní permitivity PET fólie na teplotě a frekvenci



Obr. 2.3.8 Závislost reálné složky komplexní permitivity PEN fólie na teplotě a frekvenci



Obr. 2.3.9 Závislost imaginární složky komplexní permitivity PEN fólie na teplotě a frekvenci

Závěr

Záměrem této bakalářské práce bylo shrnutí základních dielektrických aspektů a vlastností pevných izolačních materiálů, jejich využití v praxi a vyhodnocení výsledků měření dvou polymerních materiálů při využití metody dielektrické spektroskopie.

V úvodu je popsán hlavní význam použití pevných dielektrik v systémech elektrických strojů a zařízení. V teoretické části je obecně popsáno složení látek, rozdělení elektrotechnických materiálů a nosičů elektrického náboje. Jak vyplývá z textu, volné nosiče elektrického náboje, ať už vlastního nebo nevlastního charakteru, nám vždy negativně ovlivňují konduktivitu reálných dielektrik. Dále následuje popis dielektrického podsystemu, rozdělení pevných dielektrik z hlediska skupenství a podle polárnosti. Polárnost je charakteristická vlastnost dielektrik, která určuje jejich chování ve vnějším elektrickém poli a dále souvisí s popisem principu polarizace a polarizačních procesů, které se uvnitř látky odehrávají. S polarizacemi dále souvisí fyzikální vlastnosti dielektrik a tak další důležitou částí je zmínka o jejich vodivosti a dielektrických ztrátách. Všechny zmiňované aspekty jsou důležité při navrhování použití pevných dielektrik. Spolehlivá funkce izolačního systému přímo závisí na kvalitě vybraného dielektrického materiálu. Zajištění správné funkce a dlouhé životnosti elektrického stroje se bezesporu neobejde bez provádění moderní diagnostiky ve fázi vývoje, výroby a následném provozu elektrického zařízení.

Experimentální část se zabývá dielektrickou analýzou a porovnáním dvou polymerních materiálů PET a PEN. Struktura makromolekulárního řetězce PET je téměř stejná jako u PEN jen s tím rozdílem, že fólie PEN má naftalenovou skupinu namísto fenylové skupiny v řetězci. Vyhodnocení měření vybraných dielektrických parametrů bylo zaměřeno na porovnání změn průběhu reálné a imaginární složky komplexní permitivity v závislosti na teplotě (od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $160\text{ }^{\circ}\text{C}$) a frekvenci (od 50 MHz do 1 MHz) a na popisu těchto změn z matematického a chemického hlediska. Matematický popis byl proveden pomocí HN rovnice. Zvláštní pozornost byla věnována teplotní závislosti na průmyslové frekvenci 50 Hz. Výsledky z měření ukázaly (obr. 2.3.4), že PEN fólie má reálnou složku komplexní permitivity nižší než fólie PET v celém teplotním rozsahu a imaginární složku komplexní permitivity, kromě oblasti výskytu β^* -polarizace, má také nižší v porovnání s fólií PET. Jelikož naftalenová skupina poskytuje mnohem vyšší tuhost na makromolekulární řetězce, odpovídá tomu nižší stupeň dielektrické polarizace než u fenylové skupiny ve fólii PET. Kromě toho bylo zjištěno, že u PEN fólie existují tři relaxační procesy (β , β^* a M.W.S.), zatímco u PET fólie se vyskytují procesy pouze dva (β a M.W.S.). PEN fólie má navíc β^* -polarizaci, protože ta je

způsobena pouze pohyby naftalenových skupin a úroveň této polarizace dosahuje výrazně nižších hodnot v porovnání s Maxwell-Wagner-Sillars a β -polarizací u PET fólie. Výsledky dále ukázaly (obr. 2.3.5), že při frekvenci 50 Hz a teplotním rozmezí přibližně od 20 °C do 95 °C je použití PET fólie lepší z hlediska tepelných ztrát. Naopak pro teploty pod 20 °C a nad 95 °C je vhodnější použít PEN fólie, protože její ztráty v těchto oblastech jsou výrazně nižší. Skutečné využití je ale ovlivněno dalšími aspekty, jako například mechanickými nebo tepelnými vlastnostmi. Z tohoto pohledu nabízí hodnotnější vlastnosti právě PEN fólie.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KUČEROVÁ E. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [2] LIPTÁK J., SEDLÁČEK J. Úvod do elektrotechnických materiálů. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03191-8.
- [3] HASSDENTEUFEL J., KVĚT K. Elektrotechnické materiály. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [4] SKÁLOVÁ J., KOUTSKÝ J., MOTYČKA V. Nauka o materiálech. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-677-0.
- [5] MENTÍK V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [6] ŠAVEL J. Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice. 4. rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-190-X
- [7] PTÁČEK L. a kol. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [8] MENTLÍK V. a kol. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [9] MOLHANEC Martin. Dielektrické vlastnosti tuhých látek [online]. 2009 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf
- [10] KREMER F., SCHÖNHALS A. Broadband Dielectric Spectroscopy. New York: Springer, 2003. ISBN 978-3-540-43407-8.
- [11] RUNT J. P. and FITZGERALD J. J. Dielectric Spectroscopy of Polymeric Materials: Fundamentals and Applications. Washington, DC: American Chemical Society, 1997. ISBN: 978-0-8412-3335-5.
- [12] WILLIAM L. H., MARCO S. Polyethylene terephthalate (PET or PETE) Chemical compound Britannica.com. Encyclopædia Britannica [online]. 2009-2016 [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/468536/polyethyleneterephthalate-PET-or-PETE>
- [13] LEKHRAJ G. Polyethylen Naphthalene-A new-generation, high-performance polymer. Polymerupdate [online]. 1999-2012 [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://www.polymerupdate.com/general/specialfeatures/articles/lekhraj/lekhrajghai-14072012-101926.pdf>

- [14] WILMER D. Alpha A: Advanced Mainframe Analyzer for new measurement solutions. Novocontrol Technologies [online]. 2008 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.novocontrol.de/brochures/Alpha-A%202008.pdf>
- [15] WILMER D. ZGS: Active Sample Cell for the Alpha-A Modular Measurement System. Novocontrol Technologies [online]. 2016 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.novocontrol.de/brochures/ZGS.pdf>
- [16] WILMER D. Quatro Cryosystem: Universal Temperature Control System for Materials Analysis. Novocontrol Technologies [online]. 2014 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.novocontrol.de/brochures/QuatroCryo.pdf>
- [17] HARDY L., FRITZ A., STEVENSON I., BOITEUX B., SEYTRE G., SCHÖNHALS A. Dielectric relaxation behaviour of poly (ethylene naphthalene 2,6-dicarboxylate) (PEN). *Journal of Non-Crystalline Solids* 305, 2002, 174-182
- [18] HARDY L., STEVENSON I., BOITEUX B., SEYTRE G., SCHÖNHALS A. Dielectric and dynamic mechanical relaxation behaviour of poly (ethylene 2,6 naphthalene dicarboxylate). I. Anormus films. *Polymer* 42, 2001, 5679-5687
- [19] EZQUERRA T. A., BALLA-CALLEJA F. J., ZACHMANN H. G. Real time dielectric relaxation of poly (ethylene terephthalate) during crystallization from the glassy state. *Polymer* 35, 1994, 2600-2606
- [20] POP T., IORDACHE D., JONAS A. Dielectric properties of PET below its glass transition temperature. *Microelectronic Engineering* 33, 1997, 377-384
- [21] Vassilikou-Dova A., Kalogeras I. M. *Dielectric Analysis (DEA)*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009, 497-613. ISBN 978-0-471-76917-0.
- [22] HAKME C., STEVENSON I., DAVID L., BOITEUX G., SEYTRE G., SCHÖNHALS A. Uniaxially Stretched Poly (Ethylene Naphthalene 2,6-Dicarboxylate) Films Studied by Broadband Dielectric Spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids* 351, 2005, 2742-2752.
- [23] PRODROMAKIS T., PAPAVALASSILIOU C. Engineering the Maxwell-Wagner Polarization Effect. *Applied Surface Science*, 255, 2009, 6989-6994.
- [24] HIPPEL A. *Dielectric Materials and Applications*. Boston: Artech House., 1995. ISBN 1-58053-123-7.