

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Dielektrická spektroskopie kapalných izolačních materiálů**

**Ladislav Štětka**

**Plzeň 2015**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Ladislav ŠTĚTKA**  
Osobní číslo: **E12B0110K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Dielektrická spektroskopie kapalných izolačních materiálů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

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

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

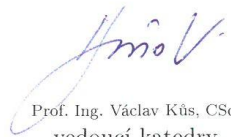
1. MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. MENTLÍK, Václav a kol. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN-technická literatura, 2008, 438 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. Elektronické informační zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Ulrych  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014  
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá analýzou a srovnáním specifických dielektrických vlastností a chemické struktury slunečnicového, řepkového a běžně užívaného transformátorového minerálního oleje. Měřené rostlinné oleje jsou z chemického hlediska směsí glycerinů, esterů a nenasycených mastných kyselin. Rostlinné oleje mají vynikající odolnost vůči hoření, dobrou biologickou rozložitelnost a jsou nevýbušné. Měřený běžně užívaný transformátorový minerální olej se vyrábí destilací ropy a je směsí různých uhlovodíků. Tento olej je poměrně hořlavý, výbušný a nebezpečný pro životní prostředí. Měření bylo provedeno metodou dielektrické spektroskopie.

## **Klíčová slova**

Polarizační mechanismy, dielektrická spektroskopie, reálná složka komplexní permitivity, imaginární složka komplexní permitivity, běžně užívaný transformátorový minerální olej, slunečnicový olej, řepkový olej.

## **Abstract**

The presented bachelor thesis deals with analysis and comparison of the specific dielectric properties and chemical structure of sunflower, rapeseed and commonly used transformer mineral oil. The measured vegetable oils are a mixture of glycerides, esters and unsaturated fatty acids from the chemical point of view. The vegetable oils have an excellent fire resistance, biodegradability and they are not explosive. The measured commonly used transformer oil is produced by distillation of crude oil and it is a mixture of various hydrocarbons. This oil is relatively flammable, explosive and dangerous for the environment. The measurement was performed by means of the dielectric spectroscopy method.

## **Key words**

Polarization mechanisms, dielectric spectroscopy, real part of complex permittivity, imaginary part of complex permittivity, commonly used transformer mineral oil, sunflower oil, rapeseed oil.

## **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 5. 6. 2015

Ladislav Štětka

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Ulrychovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ ASPEKTY FYZIKY KAPALNÝCH DIELEKTRIK .....</b>	<b>10</b>
1.1 OBECNÉ ROZDĚLENÍ DIELEKTRIK.....	10
1.2 KAPALNÁ DIELEKTRIKA .....	11
1.3 ROZDĚLENÍ PODLE POLÁRNOSTI .....	12
1.3.1 Polární dielektrika .....	12
1.3.2 Nepochární dielektrika .....	13
1.4 POLARIZACE DIELEKTRIK .....	13
1.4.1 Princip polarizace.....	13
1.4.2 Druhy polarizačních mechanismů .....	14
1.4.3 Interakce elektrického pole a látek .....	17
1.5 DIELEKTRIKA V ELEKTROSTATICKÉM A STŘÍDAVÉM POLI.....	17
1.5.1 Dielektrikum v elektrostatickém poli .....	17
1.5.2 Dielektrikum ve střídavém poli .....	18
1.6 VODIVOST DIELEKTRIK.....	19
1.6.1 Elektrická vodivost dielektrik.....	20
1.6.2 Měrný elektrický odpor dielektrik.....	20
1.7 ZTRÁTY KAPALNÝCH DIELEKTRIK .....	21
1.7.1 Druhy dielektrických ztrát .....	22
1.7.2 Dielektrické ztráty podle druhu působícího elektrického pole .....	23
1.8 DIAGNOSTIKA KAPALNÝCH DIELEKTRIK.....	24
1.9 BUDOUCNOST KAPALNÝCH DIELEKTRIK A JEJICH VLIV NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ.....	25
<b>2 MĚŘENÍ VYBRANÝCH DIELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>26</b>
2.1 POPIS MĚŘENÝCH MATERIÁLŮ .....	26
2.2 POPIS MĚŘENÍ A VYBAVENÍ PRO MĚŘENÍ.....	26
2.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	28
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>34</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>36</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$I$ (A)	elektrický proud
$\vec{D}$	vektor elektrické indukce
$\vec{E}$	vektor intenzity elektrického pole
$\Delta\vec{M}$	dipólový moment objemového elementu
M.W.S.	Maxwell-Wagner-Sillars polarizace
$\vec{P}$	vektor polarizace
$P$ (W)	činný výkon
$R$ ( $\Omega$ )	izolační odpor
$U$ (V)	napětí
$V_N$ (V)	vysoké napětí
$V_{VN}$ (V)	velmi vysoké napětí
$\Delta V$	objem elementu izolantu
$B$	$\beta$ -polarizace
$\gamma$ ( $S \cdot m^{-1}$ )	konduktivita
$\delta$ ( $^\circ$ )	ztrátový úhel
$\text{tg } \delta$ (-)	ztrátový činitel
$\varepsilon$ ( $F \cdot m^{-1}$ )	permitivita
$\varepsilon'(\omega)$ (-)	reálná složka komplexní permitivity
$\varepsilon''(\omega)$ (-)	imaginární složka komplexní permitivity
$\mu$ ( $H \cdot m^{-1}$ )	permeabilita
$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	rezistivita
$\sigma$ ( $S \cdot m^{-1}$ )	stejnoseměrná vodivostní složka
$\omega$ ( $rad \cdot s^{-1}$ )	úhlová frekvence

## Úvod

Kapalná dielektrika jsou nezastupitelnou součástí dielektrického podsystemu a jejich vhodným zvolením pro určitý typ elektrického zařízení je výrazně ovlivněna funkce, životnost a spolehlivost tohoto zařízení. Z hlediska původu se kapalná dielektrika dělí na přírodní a syntetická. Přírodní oleje se dále dělí na minerální a rostlinné. Při používání rostlinných olejů bylo zjištěno, že jejich vlastnosti nejsou příliš vhodné pro elektroizolační účely. Proto se v elektroenergetice prosadily oleje minerální, přestože jsou v porovnání s rostlinnými oleji hořlavé, výbušné a nebezpečné pro životní prostředí. Z hlediska elektroizolačních vlastností však minerální oleje jasně rostlinné oleje předčí. Možnou alternativou minerálních olejů jsou oleje syntetické. V současnosti je výzkum ekologicky a zdravotně nezávadných syntetických olejů ve velice pokročilém stádiu a v praxi se hojně používají oleje silikonové nebo organické estery vyráběné chemickou syntézou. Syntetické oleje mají výborné elektroizolační vlastnosti a v porovnání s oleji minerálními jsou nehořlavé, nevýbušné a prakticky nestárnou. Největší nevýhoda je však jejich vysoká pořizovací cena. V nedávné době se podařil výzkum rostlinných olejů s přidanými specifickými aditivami a elektroizolační vlastnosti těchto nových rostlinných olejů se již blíží olejům minerálním nebo syntetickým. Další vylepšení elektroizolačních vlastností by mohlo být získáno vyvinutím speciálních adaptovaných směsí rostlinných a minerálních olejů s vhodnými aditivami.

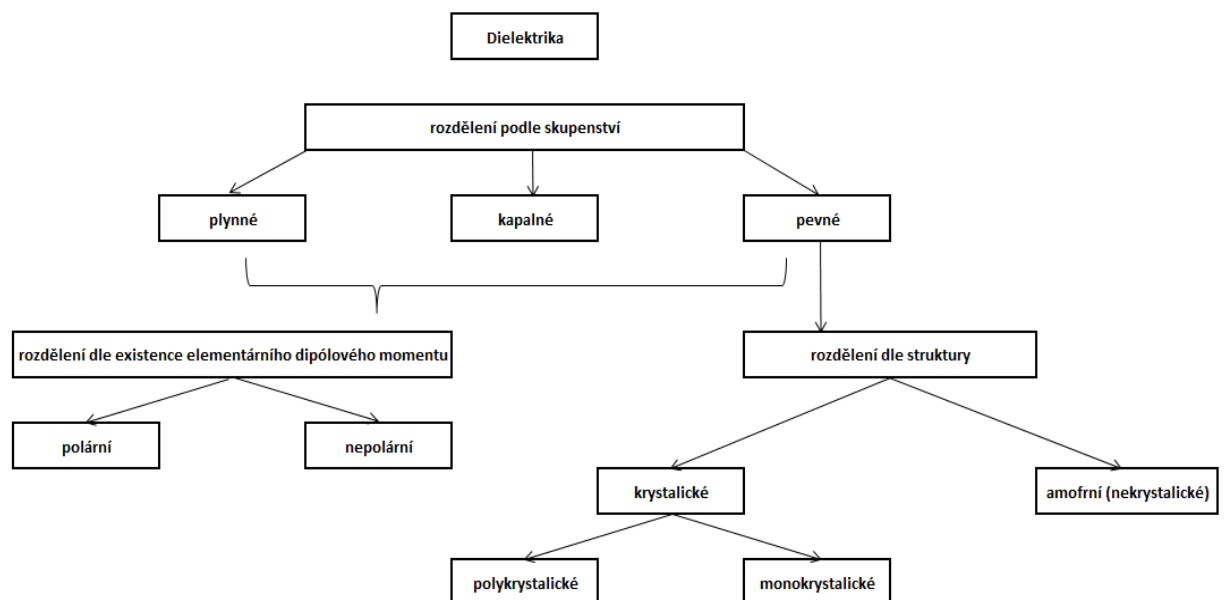
Cílem této práce je za prvé přehledně popsat základní aspekty fyziky kapalných dielektrik, a za druhé změřit a následně vyhodnotit závislost reálné a imaginární složky komplexní permitivity slunečnicového, řepkového a běžně užívaného transformátorového minerálního oleje na teplotě okolního prostředí a frekvenci vnějšího elektrického pole.

# 1 Základní aspekty fyziky kapalných dielektrik

## 1.1 Obecné rozdělení dielektrik

Dielektrikum je látka, která je schopná polarizace, resp. být polarizována a tudíž schopná si vytvořit v elektrickém poli vlastní vnitřní elektrické pole. Důležitým kritériem chování dielektrika v elektrickém poli je jeho permitivita - tedy parametr, který podstatně ovlivňuje funkci elektrických zařízení a přístrojů. [1, 3]

Dielektrika se dělí podle skupenství na plynná, kapalná a pevná, podle uspořádání na polární a nepolární a u pevných dielektrik podle struktury na krystalické a amorfní (obr. 1.1.1). [1, 3]



Obr. 1.1.1 Rozdělní dielektrik [1]

Podmnožinou dielektrik jsou izolanty. Izolanty se v elektrotechnice používají k oddělení míst s různými elektrickými potenciály. Jsou to tedy látky, které brání průchodu elektrického proudu. Ideálním izolantem by byla látka absolutně nevodivá. V praxi však taková látka neexistuje a i ve velmi dobrých izolantech se vyskytují nosiče elektrického náboje, které způsobují vedení malého elektrického proudu. Důležitými parametry izolantů jsou vysoká elektrická pevnost a velká rezistivita. [3] Celá tato práce se zabývá kapalnými dielektriky, která jsou svými vlastnostmi velmi vhodná pro použití v elektroizolační technice.

## 1.2 Kapalná dielektrika

Hlavním tématem, kterým se bude tato bakalářská práce podrobněji věnovat, jsou kapalná dielektrika. Obecné vlastnosti kapalných dielektrik jsou vysoká elektrická pevnost, dobrá tepelná vodivost a vysoký izolační odpor. Vzhledem ke svému skupenství mají oproti pevným dielektrikům výhodu ve své tekutosti. Dobře zaplňují dutiny a póry v zařízeních a přístrojích, což zlepšuje elektrickou pevnost. Kapalná dielektrika současně mohou díky své dobré tepelné vodivosti plnit funkci chladicího média, využívají se také ke zhášení oblouku nebo jako protikorozní prostředek. [2, 3]

Kapalná dielektrika jsou využívána zejména v kondenzátorech a výkonových olejových transformátorech. Dříve byla používána i v olejových kabelech, vypínačích či v průchodkách VN a VVN. Pro fungování v těchto elektrických zařízeních jsou používány takové kapaliny, jejichž vlastnosti vyhovují požadovanému využití. [8, 15]

Například u transformátorového oleje jsou základními vlastnostmi, které jsou i předmětem diagnostiky izolačních olejů zahrnující měření izolačních a chladících vlastností, hustota, viskozita, bod vzplanutí, bod tuhnutí, obsah vody v oleji, číslo kyselosti, elektrická pevnost, vnitřní rezistivita, obsah inhibitorů, reálná a imaginární složka komplexní permitivity. [2]

U spínačů měly oleje za úkol co nejrychleji uhasit oblouk vznikající oddálením kontaktů pod zatížením. U kabelů se olej využíval jako impregnace. Zde však na rozdíl od transformátorového oleje, kde se požaduje nízká viskozita, je naopak u olejů využívaných k impregnaci kabelů žádoucí viskozita vysoká, aby nedocházelo ke stékání oleje. [7, 8, 15]

Kapalná dielektrika jsou rozdělena do dvou skupin, jejichž rozdílnost je především v původu základní výrobní suroviny a s tím související rozdílnost v jejich chemické struktuře a vlastnostech. Podle vzniku je lze rozdělit na přírodní kapalná dielektrika (např. minerální oleje, rostlinné oleje apod.) a syntetická kapalná dielektrika (chlorované uhlovodíky, silikonové oleje, polybuteny apod.). [3]

Pro účely navazujícího experimentu (kap. 2) je práce zaměřena na přírodní kapalná dielektrika, jako jsou oleje minerální a rostlinné. Nejpoužívanějším a nejrozšířenějším používaným olejem v elektrotechnice je minerální olej. Minerální oleje se dále dělí podle použití na oleje transformátorové, kabelové, kondenzátorové a spínačové. Minerální oleje se získávají z ropy pomocí destilace. Obsažené nečistoty se odstraňují aktivní hlinkou a následným odfiltrováním. Běžný minerální olej je z chemického hlediska směs naftenových, aromatických a parafinických uhlovodíků. Konečné vlastnosti běžného minerálního oleje

závisí na jeho složení. Hlavní výhodou jsou vynikající dielektrické vlastnosti, ale nevýhodou je jejich hořlavost, výbušnost a rizika pro životní prostředí. [2, 3, 7, 13, 15]

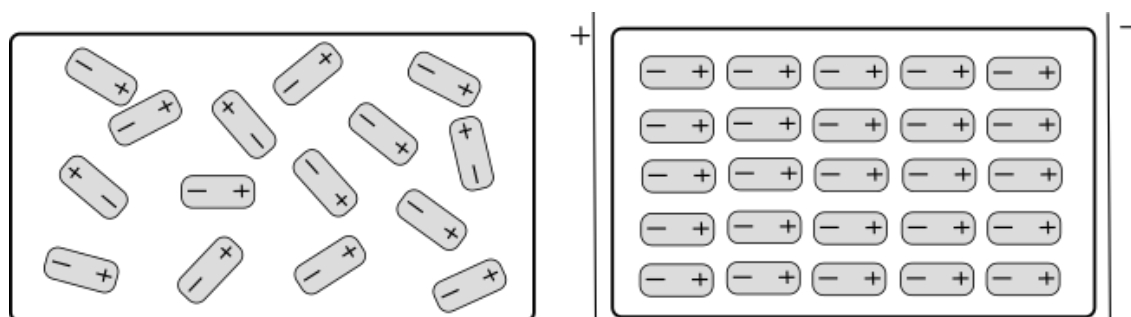
Rostlinné oleje patří mezi skupinu organických sloučenin, které jsou generovány reakcí kyseliny s alkoholem. Tyto kapaliny jsou přírodními estery s triglyceridovou strukturou, pocházející z chemického sloučení tří mastných kyselin a jedné molekuly glycerolu. Kapaliny tohoto složení mají především výbornou odolnost vůči hoření a biologickou rozložitelnost. [1, 3]

### 1.3 Rozdělení podle polárnosti

Dielektrika se podle polárnosti dělí na polární a nepolární, což je dáno samotnou strukturou materiálu. Podle průběhu polarizace u těchto dvou skupin se polarizace rozděluje na orientační a posuvné. Toto dělení určuje chování materiálu bez nebo s připojením vnějšího elektrostatického nebo střídavého pole. [1, 3, 13]

#### 1.3.1 Polární dielektrika

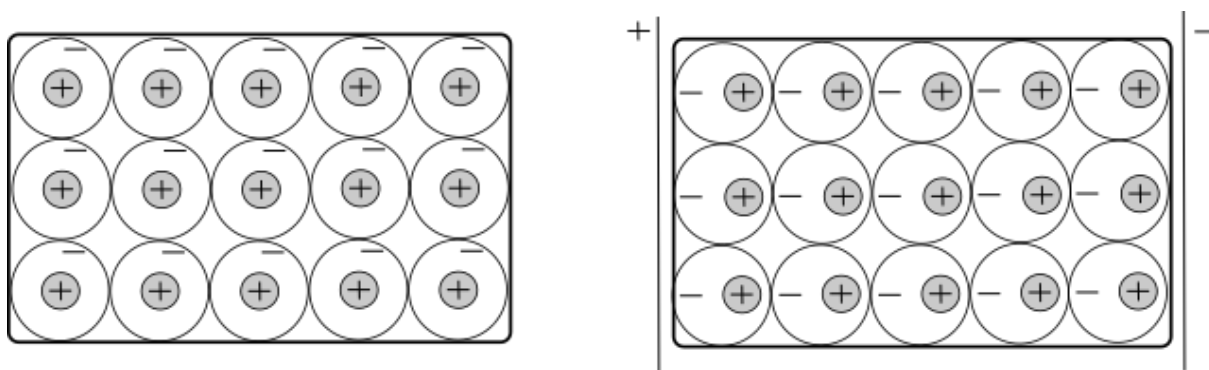
Polární dielektrika obsahují ve své vnitřní struktuře stálé elektrické dipóly. Bez přiložení vnějšího pole se polární dielektrikum jeví jako neutrální, jelikož se vzájemné působení dipólů vruší. Po přiložení vnějšího elektrického pole se dipóly natočí do směru působení vnějšího pole (obr. 1.3.1) a orientace těchto dipólů je tím úplnější, čím je větší intenzita elektrického pole a současně teplota dielektrika nižší. Doba, která je potřebná k natočení dipólu ve směru působícího pole, závisí na druhu dielektrika. Tato doba může být u různých druhů dielektrik velice rozdílná. [1, 3, 13]



Obr. 1.3.1 Polární dielektrikum [10]

### 1.3.2 Nepochární dielektrika

Nepochární dielektrika jsou bez přiložení vnějšího elektrického pole neutrální. Po připojení vnějšího elektrického pole dochází k polarizaci uvnitř atomů, kdy se mírně posune elektronový obal a jádro ve směru působení přiloženého vnějšího pole a tím vznikne indukovaný elementární dipól, jak je znázorněno na obr. 1.3.2. [1, 3, 13]



Obr. 1.3.2 Nepochární dielektrikum [10]

## 1.4 Polarizace dielektrik

Polarizace dielektrika je děj, který probíhá v látce při působení vnějšího elektrického pole nebo jiných vnějších vlivů. [1, 3]

### 1.4.1 Princip polarizace

Polarizace dielektrika je způsobena vnějším elektrickým polem, které může být jak stejnosměrné, tak střídavé. Jedná se o proces, kdy působením sil elektrického pole dochází k narušení symetrie, rozdělení elektrických nábojů a vzniku dipólů. Polarizací se z atomů nebo molekul působením přitažlivých a odpudivých sil stanou elektrické dipóly. Tyto dipóly se natáčí ve směru elektrického pole. Pokud působení vnějšího elektrického pole zanikne, dipóly se vrátí do původního stavu. Stav polarizovaného dielektrika je popsán vektorem polarizace, který představuje součet dipólových momentů zorientovaných ve směru pole k objemu materiálu. [1, 7, 11, 13, 14]

Vektor polarizace je vyjádřen vztahem:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V}, \quad (1.4.1)$$

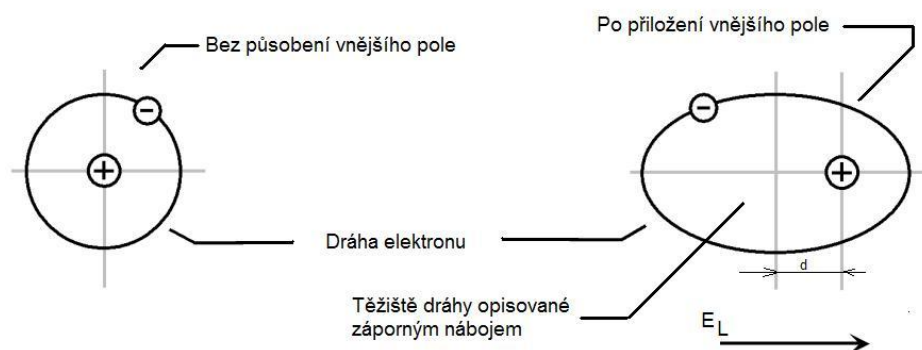
kde  $\vec{P}$  je vektor polarizace,  $\Delta \vec{M}$  dipólový moment objemového elementu a  $\Delta V$  objem elementu izolantu. [1]

Polarizace dielektrika podle povahy vazebních sil je dělena na pružnou a nepružnou polarizaci. Pružná polarizace je charakteristická svou rychlou změnou rovnovážných elektrických a vazebních sil a není závislá na teplotě. Pružné polarizace jsou polarizace elektronové a iontové. U nepružných polarizací dochází k většímu posunutí nábojů než u pružných, čímž doba k ustálení do rovnovážného stavu je delší. Tento druh polarizace je silně závislý na teplotě. Mezi nepružné polarizace jsou zařazeny polarizace Maxwell-Wagner-Sillars, spontánní, iontové relaxační a dipólové relaxační. [1, 13]

#### 1.4.2 Druhy polarizačních mechanismů

##### Elektronová polarizace

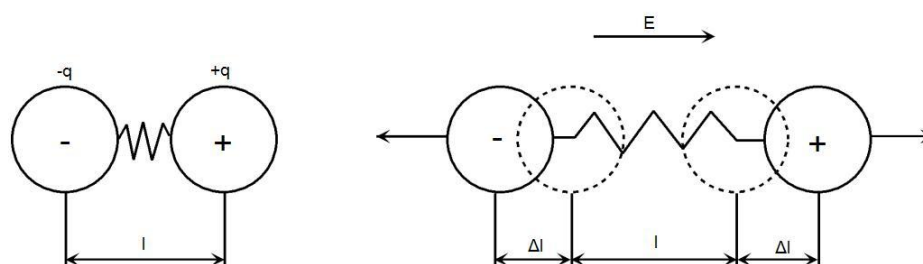
Při této polarizaci dochází pod vlivem vnějšího elektrického pole k posunutí středu elektronového obalu vzhledem ke kladnému jádru, resp. k posunutí těžiště záporného náboje o určitou vzdálenost od těžiště kladného náboje. Jedná se o polarizaci frekvenčně a tepelně nezávislou, kde nedochází ke ztrátě energie, jelikož polarizační děj probíhá uvnitř atomů. Elektrony jsou silně vázány k jádru atomu a při působení vnějšího pole jsou tudíž vychýleny jen na malé vzdálenosti. Na obr. 1.4.1 je schematicky znázorněna elektronová polarizace, a to na modelu atomu vodíku. K elektronové polarizaci dochází u všech látek ve všech skupenstvích. [1, 13]



Obr. 1.4.1 Schematické znázornění elektronové polarizace na modelu atomu vodíku [1]

### Iontová polarizace

V tomto typu polarizace hlavní roli hrají ionty, jež jsou stavebními prvky iontových krystalů. U iontové polarizace existují určité dipólové momenty i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Při působení vnějšího elektrického pole dochází k pružnému posunutí iontů. Záporné ionty se posunou proti směru pole a kladné ve směru pole. K vlastnímu dipólovému momentu se působením elektrického pole připočítá indukovaný dipólový moment (obr. 1.4.2). Iontová polarizace je stejně jako elektronová polarizace bezeztrátová a teplotně a frekvenčně nezávislá. Teplotní závislost iontové polarizace má oproti elektronové polarizaci kladný charakter. [1, 13]



Obr. 1.4.2 Vznik dipólového momentu [1]

### Relaxační polarizace

Jedná se o typ polarizace, který proběhne pouze za přítomnosti elektrického pole a rozhodujícím faktorem v případě této polarizace je teplota, resp. tepelný pohyb nosičů elektrického náboje. Druhy relaxačních polarizací jsou děleny na relaxační polarizaci iontovou a relaxační polarizaci dipólovou.

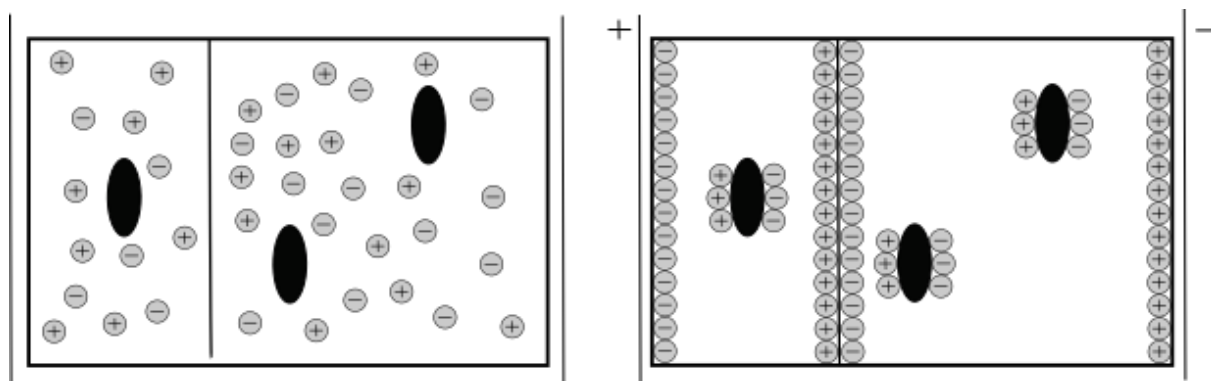
Relaxační polarizace je možná pouze u polárních dielektrik, kde se na polarizaci podílí slabě vázané částice, které jsou nosiči elektrického náboje. Vlastností slabě vázaných částic je velice dobrá schopnost orientace ve směru přiloženého elektrického pole. [1, 13]

### Maxwell-Wagner-Sillars polarizace

Jedná se o migrační polarizaci dielektrika. Polarizačních jevů v dielektriku se účastní jak vázané nosiče náboje, tak elektricky volné náboje. Nutnou podmínkou vzniku migrační polarizace je existence makroskopických nehomogenit v materiálu. Po přiložení vnějšího elektrického pole se na těchto nehomogenitách zachycují migrující volné nosiče náboje. Typy nehomogenit mohou být praskliny, bubliny, různé nečistoty materiálu, případně strukturální



poruchy. V místech zmiňovaných nehomogenit v materiálu jsou vytvořené oblasti, které neodpovídají vlastnostem původního dielektrika. Tudiž v těchto prostorech má materiál jiné vlastnosti, což se projeví různou relativní permitivitou a měrnou elektrickou vodivostí. Tím dochází ke stavu, že nosiče elektrického náboje se v těchto místech zachycují a vytváří rozhraní dvou prostředí, jako by se jednalo o rozhraní dvou různých dielektrik (obr. 1.4.3). [1]



Obr. 1.4.3 Vznik prostorového náboje v nehomogenním dielektriku [1]

Maxwell-Wagner-Sillars polarizace je v porovnání s elektronovou, iontovou nebo dipólovou polarizací nejpomalejší. Tento druh polarizace je ztrátový. Velikost ztrát stejně jako u relaxačních polarizací je závislá na druhu vnějšího elektrického pole, jeho frekvenci a samozřejmě na teplotě. [1]

### Bez působení vnějšího elektrického pole

Dalšími druhy polarizací jsou takové polarizace, které proběhnou i bez působení vnějšího elektrického pole. Mezi tyto polarizace patří spontánní, piezoelektrická a pyroelektrická polarizace. Spontánní polarizace se vyskytuje u elektretů, což jsou dielektrika schopná udržet ve svém okolí stálé elektrické pole. Piezoelektrická polarizace je uplatňována v látkách, které jsou schopné se polarizovat vlivem mechanického namáhání. Pyroelektrická polarizace jsou dělena na polarizaci u lineárních a nelineárních pyroelektrik. U lineárních pyroelektrik dochází k polarizaci působením vnější teploty, zatímco u nelineárních, tzv. feroelektrik, se jejich struktura rozpadá do jednotlivých domén, z nichž je každá spontánně polarizovaná. [1]

### 1.4.3 Interakce elektrického pole a látek

Vložením látek do elektrického pole dojde k působení elektrického pole na látku (interakci) a v této látce začnou probíhat děje, které se nazývají polarizačními procesy. Tyto procesy jsou zkoumány z hlediska makroskopického nebo mikroskopického. [1, 3, 13]

U makroskopického hlediska je výsledkem polarizace vznik vázaného náboje na povrchu dielektrika, kde se objeví elektricky vázaný náboj. Zajímavá je interakce povrchu dielektrika s okolním prostředím. Mikroskopické hledisko oproti makroskopickému hledá fyzikální podstatu polarizačních jevů probíhající uvnitř (ve struktuře) dielektrika. Výsledkem mikroskopické polarizace je orientace stávajících nebo vznik nových dipólů. U mikroskopického hlediska je charakterizující polarizační jev tzv. polarizovatelnost  $\alpha$ . Udává změnu systému dielektrika ve vnějším poli při polarizování. [1, 3]

## 1.5 Dielektrika v elektrostatickém a střídavém poli

### 1.5.1 Dielektrikum v elektrostatickém poli

Elektrostatické pole je časově neproměnné elektrické pole a je zařazeno mezi stacionární elektrická pole. Působí-li vnější elektrostatické pole na dielektrikum, toto dielektrikum získá z hlediska makroskopického dipólový moment  $\Delta\vec{M}$  objemového elementu  $\Delta V$  (rovnice 1.4.1). Tento moment je zorientovaný ve směru působení vnějšího elektrostatického pole. [1]

Jednou z nejdůležitějších veličin při makroskopickém pohledu na chování dielektrika je relativní permitivita  $\varepsilon_r$ . Relativní permitivita je podíl permitivity materiálu  $\varepsilon$  a permitivity vakua  $\varepsilon_0 = 8,8854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}. \quad (1.5.1)$$

Relativní permitivita je jedním ze zásadních parametrů pro výpočet kapacity kondenzátoru, pro něž platí vztah:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}, \quad (1.5.2)$$

kde  $C$  je již zmíněná kapacita,  $S$  je plocha desek kondenzátoru a  $d$  je délka mezi těmito deskami, kde se nachází dielektrikum. [1]

Dále platí vztah pro vektor elektrické indukce:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E}, \quad (1.5.3)$$

kde  $\vec{D}$  je vektor elektrické indukce a  $\vec{E}$  je vektor intenzity elektrického pole. [1]

### 1.5.2 Dielektrikum ve střídavém poli

Chování dielektrik během působení střídavého pole je značně odlišné od chování dielektrik během působení pole elektrostatického. S tím souvisí fakt, že i děje probíhající při působení střídavého pole jsou odlišné. Na dielektrikum působí střídavé pole s předpokládaným sinusovým průběhem a tím dochází k periodicky se měnící polaritě působící na toto dielektrikum. Z důvodu setrvačnosti způsobené kinetickou vlastností částic, které sledují změnu polarity působícího pole, dochází právě při této změně polarity k fázovému zpoždění vektoru elektrické indukce  $\vec{D}$  za vektorem intenzity elektrického pole  $\vec{E}$ . Toto zpoždění se nazývá ztrátový úhel  $\delta$ . Pomocí symbolicko-komplexní metody je vztah vektoru elektrické indukce a vektoru intenzity elektrického pole vyjadřován následovně:

$$\vec{D}(t) \rightarrow \vec{D}_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)}, \quad (1.5.4)$$

$$\vec{E}(t) \rightarrow \vec{E}_m \cdot e^{j\omega t}, \quad (1.5.5)$$

kde  $\vec{D}_m$  a  $\vec{E}_m$  jsou amplitudy jednotlivých vektorů. Úhlová rychlost ve vzorci označená  $\omega$  je závislá na příslušné frekvenci  $f$  vnějšího elektrického a je charakterizována vztahem:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (1.5.6)$$

[1, 14]

Dále platí vztah mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole:

$$\vec{D}_m \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot \vec{E}_m, \quad (1.5.7)$$

který je svým způsobem velmi podobný vztahu mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole v elektrostatickém poli. [1, 13, 15]

Pro střídavé elektrické pole v analogii na relativní permitivitu zavedenou v elektrostatickém poli je definována frekvenčně závislá komplexní relativní permitivita  $\varepsilon^*(j\omega)$ . Pro výpočet komplexní permitivity platí vztah:

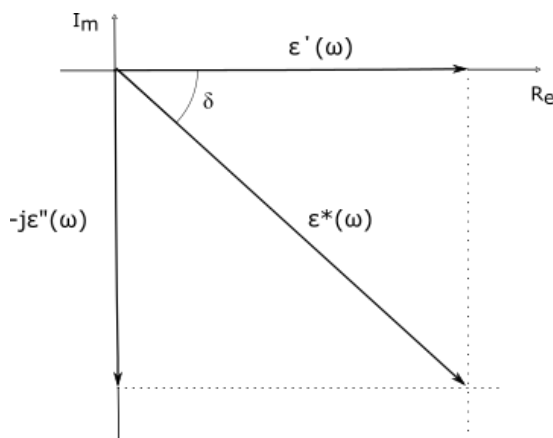
$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (1.5.8)$$

kde  $\varepsilon'(\omega)$  je reálná složka komplexní permitivity odpovídající stupni dielektrické polarizace, což je vlastní relativní permitivita, která je mírou kapacitního charakteru dielektrika a  $\varepsilon''(\omega)$  je imaginární složka komplexní permitivity odpovídající dielektrickým ztrátám vzniklým v dielektriku namáhaném střídavým elektrickým polem. [1, 5, 13, 15]

Grafickým vyjádřením (obr. 1.5.1) vztahu reálné a imaginární složky komplexní permitivity lze pomocí ztrátového úhlu  $\delta$  určit ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$ . Tento vztah je vyjádřen vzorcem:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)}. \quad (1.5.9)$$

[1, 5]



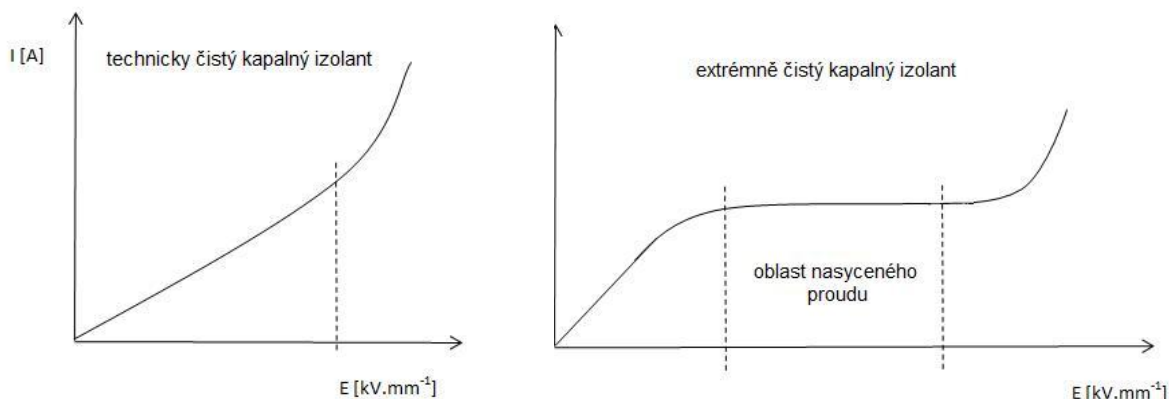
Obr. 1.5.1 Grafické znázornění komplexní permitivity [1]

## 1.6 Vodivost dielektrik

Určitou vodivost má každé dielektrikum, což je v případě předpokládaného využití látky jako izolantu nežádoucí a je proto nutné brát to v úvahu při návrhu užití pro elektrické stroje a zařízení. Neméně důležitým aspektem je fakt, že při průchodu proudu materiálem se tento materiál zahřívá. [1]

### 1.6.1 Elektrická vodivost dielektrik

Ideální dielektrikum neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje ani jiné příměsi a tudíž má nulovou konduktivitu (vodivost). Ve skutečnosti však obsahuje určité množství nosičů a každé dielektrikum má určitou vodivost. Kapalná dielektrika se z hlediska vodivostních jevů dělí na technicky čisté kapalně izolanty a extrémně čisté kapalně izolanty. Jejich odlišnosti z pohledu voltampérové charakteristiky jsou znázorněny na obr. 1.6.1. [1]



Obr. 1.6.1 VA charakteristiky technických a extrémně čistých kapalných izolantů [1]

Elektrická vodivost je rozdělena podle typů nosičů na elektronovou, děrovou, protonovou, iontovou a elektroforetickou. Elektrický náboj v případě elektronové, děrové, protonové a iontové vodivosti je 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, kapalně, plynné) mají tuto vzdálenost velmi rozdílnou. [1, 3]

### 1.6.2 Měrný elektrický odpor dielektrik

Vnitřní rezistivita materiálu se značí  $\rho$ , izolační odpor  $R$ . Vzájemný vztah měrného elektrického odporu (rezistivity) a měrné elektrické vodivosti (konduktivity) je vyjádřen vztahem:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (1.6.1)$$

[1]

## 1.7 Ztráty kapalných dielektrik

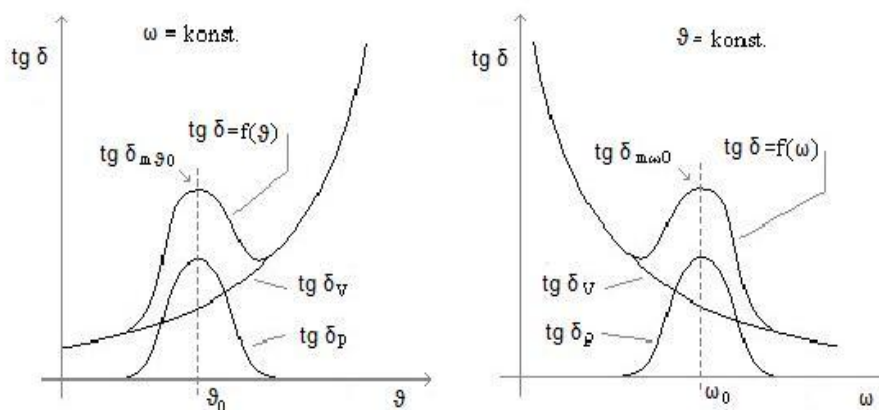
Je-li dielektrikum vloženo do elektrického pole, určitá část elektrické energie je přeměněna na nežádoucí teplo. Dielektrické ztráty jsou závislé na látce a jejím složení. Dielektrické ztráty jsou rozdílné ve stejnosměrném a střídavém elektrickém poli. [1]

Dielektrické ztráty v kapalných materiálech jsou především odvíjeny od množství a druhu příměsí obsažených v látce. Dielektrické ztráty kapalných dielektrik jsou dále rozděleny podle typu dielektrika, resp. zda se jedná o kapalinu polární nebo nepolární. [1, 3]

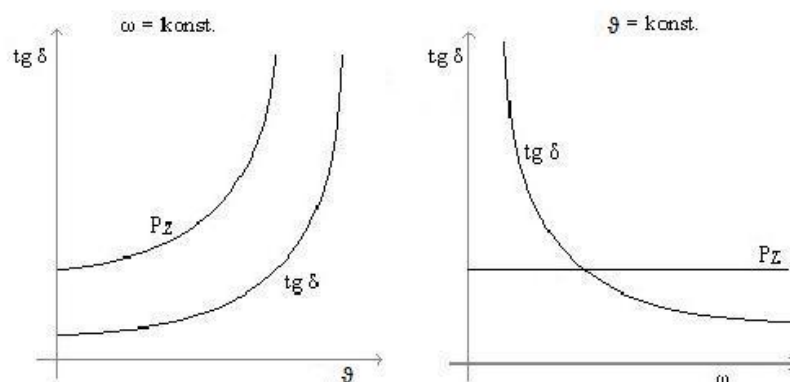
U polárních kapalin se na rozdíl od kapalin nepolárních vyskytují kromě vodivostních ztrát i výrazné ztráty polarizační. Dielektrické ztráty u polárních kapalin jsou podstatně větší než u kapalin nepolárních. [1]

Na obr. 1.7.1 je znázorněna teplotní a frekvenční charakteristika polárních kapalných izolantů, u nichž, jak již bylo zmíněno, se vyskytují i výrazné ztráty polarizační. Výsledná zobrazená charakteristika představuje složení dvou průběhů odpovídající vodivostním a polarizačním ztrátám. Průběh polarizační složky  $\delta_V$  v závislosti na teplotě je exponenciální a teplotní závislost polarizační složky  $\delta_P$  ukazuje maximum a má tvar distribuční funkce. [1, 5]

Na obr. 1.7.2 je znázorněna teplotní a frekvenční charakteristika nepolárních kapalných izolantů, u nichž jsou dielektrické ztráty způsobeny pouze elektrickou vodivostí. Stejně jako u polárních kapalných izolantů je výsledná křivka exponenciální. [1, 5]



Obr. 1.7.1 Teplotní a frekvenční charakteristika  $\text{tg } \delta$  polárních kapalných izolantů. [1]

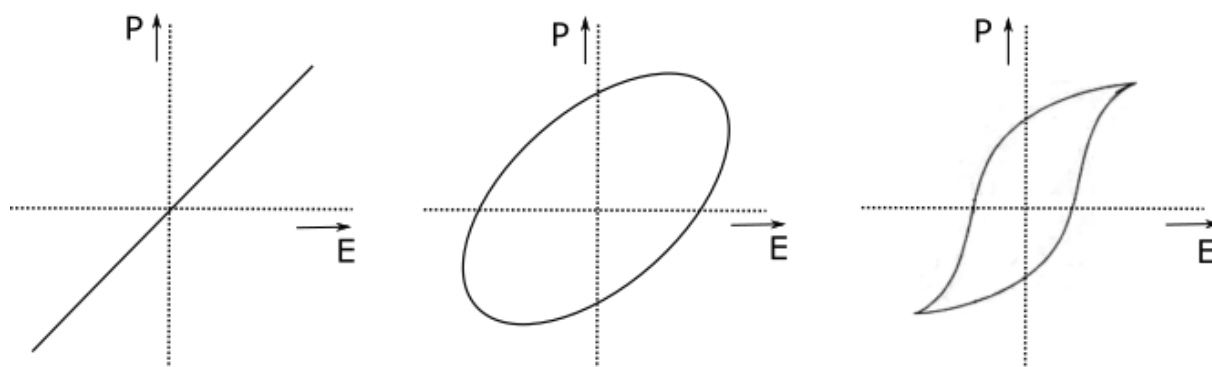


Obr. 1.7.2 Teplotní a frekvenční charakteristika  $\text{tg } \delta$  nepolárních kapalných izolačních materiálů. [1]

### 1.7.1 Druhy dielektrických ztrát

Vodivostní ztráty vznikají vlivem vodivostního proudu, který protéká dielektrikem. Tyto ztráty se vyskytují u všech dielektrik a závisí na velikosti konduktivity materiálu. Velikost konduktivity je stěžejní vlastnost, jelikož se zvýšením konduktivity dielektrika roste velikost vodivostních ztrát, což ovlivňuje užití konkrétního materiálu pro praktické účely. Průchodem vodivostního proudu se dielektrikum ohřívá a dochází k jeho tepelné degradaci. [1, 14]

Polarizační ztráty vznikají tím, že vnější elektrické pole překonává a usměrňuje chaotický pohyb částic. To je příčinou opožďování pohybů vázaných nosičů elektrického náboje za změnami vnějšího elektrického pole. Část energie získané na úkor elektrického pole se mění v teplo. Z pohledu závislosti polarizace na intenzitě elektrického pole jsou rozlišovány tři druhy závislostí. U materiálů, kde se vyskytují pouze pružné polarizace, polarizační ztráty nevznikají a závislost vektoru polarizace na intenzitě působení elektrického pole, je lineární, jak je uvedeno na obr. 1.7.3. Pokud se v dielektriku vyskytují i polarizace relaxační, výsledná křivka má tvar elipsy (obr. 1.7.3). U feroelektrických látek má závislost tvar hysterezní smyčky (obr. 1.7.3). [1, 14]



Obr. 1.7.3 Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole. [1]

### 1.7.2 Dielektrické ztráty podle druhu působícího elektrického pole

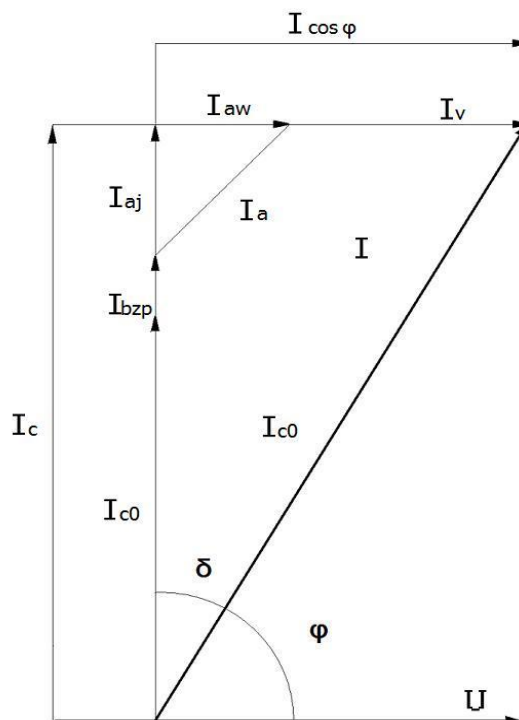
Jestliže na dielektrikum působí stejnosměrné elektrické pole, je rozhodujícím faktorem velikosti ztrát velikost vodivostního proudu. Průchodem vodivostního proudu vznikají v dielektriku Jouleovy ztráty. Při působení stejnosměrného pole se mohou vyskytnout i ionizační ztráty, avšak v porovnání s vodivostními ztrátami jsou nepodstatné. Ztrátový výkon ve stejnosměrném elektrickém poli se vypočítá podle vztahu:

$$P_{ZSS} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (1.7.1)$$

kde  $R_i$  je izolační odpor dielektrika,  $I$  je ustálená hodnota proudu procházejícího dielektrikem a  $U$  je napětí přiložené na vzorek. [1, 3, 7]

Při působení střídavého elektrického pole jsou navíc uplatňovány ztráty polarizační a také ionizační ztráty mohou mít výraznější vliv než při působení stejnosměrného elektrického pole. Z toho vyplývá, že při působení střídavého elektrického pole jsou celkové ztráty mnohem větší než při působení stejnosměrného elektrického pole. Při výpočtu dielektrických ztrát ve střídavém poli je potřeba brát v potaz skutečnost, že ve střídavém poli se průběh elektrické indukce zpožďuje za průběhem intenzity elektrického pole. Toto zpoždění se vyjadřuje jako ztrátový úhel  $\delta$ . Fázový diagram reálného dielektrika je zobrazen na obr. 1.7.4. [1, 7]





Obr. 1.7.4 Fázový diagram reálného dielektrika. [1]

Do vztahu pro výpočet dielektrických ztrát ve střídavém poli dle fázového diagramu reálného dielektrika (obr. 1.7.4) je zahrnuto přiložené napětí a velikost proudu  $I_c$ , který je složen z nabíjecího proudu  $I_{c0}$ , kterým se nabíjí geometrická kapacita a dále proudů odpovídajících rychlým bezeztrátovým polarizacím  $I_{bzp}$ , absorpčním proudem odpovídajícím pomalým polarizacím  $I_a$  a činnou složkou odpovídající ztrátám energie v dielektriku  $I_{aw}$ . Výsledný vztah ztrátového výkonu ve střídavém elektrickém poli je:

$$P_{Z\,stř} = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (1.7.2)$$

[1, 7]

## 1.8 Diagnostika kapalných dielektrik

Pro správnou funkci jednotlivých elektrických zařízení a následně celého elektrického systému je nutné vytvořit takový funkční celek, který by měl splňovat požadavky k bezproblémovému zakomponování jednotlivého elektrického zařízení do elektrické soustavy, a to od výroby elektrické energie přes její distribuci k následnému využití koncovými uživateli. Zásadními aspekty pro navrhování celé elektrické soustavy jsou

spolehlivost systému, požadavky na minimalizaci z hlediska rozměrů a hmotnosti, využití maximální účinnosti zařízení a tím související minimalizace nežádoucích ztrát, vlivu na životní prostředí a v neposlední řadě i ekonomické hledisko. [2, 5, 10]

Diagnostika kapalných dielektrik se především provádí z důvodu zjištění fyzikálních a chemických vlastností materiálu. Tématem této práce je dielektrická spektroskopie kapalných izolantů. Jedná se o jednu z mnoha metod diagnostiky materiálu, která u elektrických zařízení plněných kapalinou (olejem) může být vykonána. Kapalně izolanty plní velice často funkci elektroizolační a v převážné většině zařízení jsou součástí i chladicího systému. Jedná se tedy o velmi citlivé místo, které zásadně ovlivňuje chod a životnost elektrických zařízení. [2, 5, 10]

### 1.9 Budoucnost kapalných dielektrik a jejich vliv na životní prostředí

Využití kapalných dielektrik nebo izolantů je třeba posuzovat nejenom z hlediska požadovaných elektrických parametrů, ale i z hlediska vlivu na životní prostředí a jejich výroby.

Minerální oleje jsou v současné době stále nejvýhodnější alternativou v oblasti energetiky pro VN a VVN elektrické přístroje, avšak existují minimálně dva důvody, proč se zabývat hledáním adekvátní alternativy. Prvním ze zásadních důvodů je vliv na životní prostředí. U minerálních olejů, které jsou vyráběny destilací z ropy, hrozí v případě úniků kontaminace půdy či povrchových nebo spodních vod, a tím závažné poškození životního prostředí. K tomuto může dojít v případě poruchy zařízení, v průběhu kontrolních měření, opravách, při přepravě či instalaci zařízení obsahující tyto oleje a v neposlední řadě i při stále častějších krádežích olejů z volně přístupných transformátorů. Druhým důvodem je výroba minerálních olejů. Jak již bylo zmíněno, minerální oleje se vyrábí z ropy. Zásoby ropy, jejíž spotřeba výrazně v celosvětovém měřítku roste, nejsou nevyčerpatelné, a proto je nutné hledat jiné izolační kapaliny, jako jsou třeba speciálně upravované rostlinné oleje nebo oleje syntetické. [3-6, 9]

Z pohledu vlivu na životní prostředí jsou nejméně škodlivé rostlinné oleje, které však, jak ukáže následující experiment, nejsou schopny plnit náročné požadavky na kapalná dielektrika pro elektrická zařízení. Při experimentálních výzkumech rostlinných olejů byla zjištěna především nepříznivá hodnota imaginární složky komplexní permitivity, reálné složky komplexní permitivity, oxidační stability, bodu tuhnutí a kinematické viskozity. Na druhou stranu rostlinné oleje jsou dobře biologicky odbouratelné a jsou klasifikovány jako obtížně hořlavé. [4, 9]

## 2 Měření vybraných dielektrických parametrů

Pro následný experiment byly zvoleny vzorky transformátorového minerálního oleje a dvou rostlinných olejů. Dielektrické vlastnosti jsou závislé na chemickém složení a cílem experimentu bylo porovnat chemické složení a změny reálné složky komplexní permitivity odpovídající stupni dielektrické polarizace a imaginární složky komplexní permitivity odpovídající dielektrickým ztrátám u běžně užívaného transformátorového minerálního oleje oproti slunečnicovému a řepkovému oleji v závislosti na teplotě a frekvenci. Pro měření byla použita metoda dielektrické spektroskopie. Dielektrická spektroskopie je nedestruktivní diagnostická metoda. Dielektrická spektroskopie je založena na zaznamenávání dielektrické odezvy pohybujících se nosičů elektrického náboje v materiálu, jejichž pohyb závisí na změně vnějšího elektrického pole a teplotě okolního prostředí. Přínosem diagnostiky olejů, která je předmětem této práce, je zjištění závislosti reálné a imaginární složky komplexní permitivity dielektrického materiálu na frekvenci na teplotě. [16, 17]

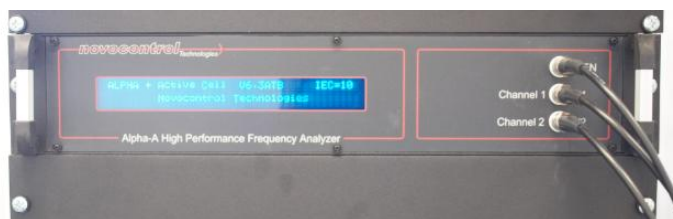
### 2.1 Popis měřených materiálů

Pro měření byly použity vzorky běžně užívaného transformátorového minerálního, slunečnicového a řepkového oleje. Měřený běžně užívaný transformátorový minerální olej se vyrábí ze surové ropy a patří ke skupině naftenových olejů, které se skládají hlavně z cykloalkanů [6, 18]. Transformátorové minerální oleje jsou poměrně hořlavé kapaliny a jsou nebezpečné pro životní prostředí. Slunečnicový olej se vyrábí ze slunečnicových semen. Skládá se z triglyceridů a převážně z kyselin linolové a olejové [6, 19]. Řepkový olej je lisovaný ze semen řepky. Skládá se z triglyceridů a převážně z kyselin olejové, linolové a  $\alpha$ -linolenové. [6, 20]

### 2.2 Popis měření a vybavení pro měření

Měření bylo provedeno pomocí frekvenčního analyzátoru Alpha-A Analyzer (obr. 2.2.1), elektrodového systému ZGS Alpha Active Sample Cell (obr. 2.2.2), systému Quatro Cryosystem (obr. 2.2.3), držáku na vzorky pro kapalně materiály BDS 1308 a počítače k záznamu naměřených dat. Celkové umístění přístrojů předkládá obr. 2.2.4. Pro měření byl použit držák na vzorky BDS 1308. Do tohoto držáku bylo před měřením nakapáno 20  $\mu$ l zkoumaného oleje. Dielektrické parametry byly hodnoceny podle jejich změn ve střídavém poli 1 V, ve frekvenčním pásmu od 50 mHz do 100 kHz a v teplotním rozsahu od 50 °C do 90 °C. Před měřením byly vzorky olejů vysušeny. Vysoušení bylo provedeno při

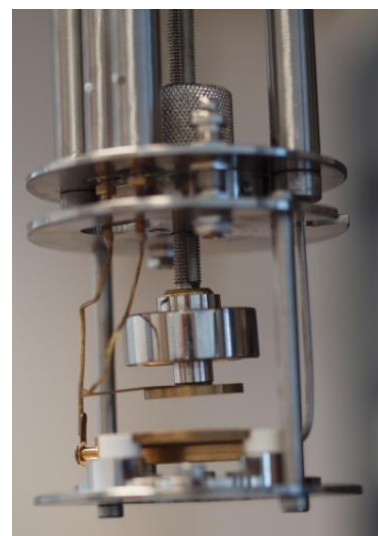
teplotě 110 °C po dobu 2 hodin pomocí horkovzdušné sušičky.



Obr. 2.2.1 Frekvenční analyzátor Alpha-A Analyzer

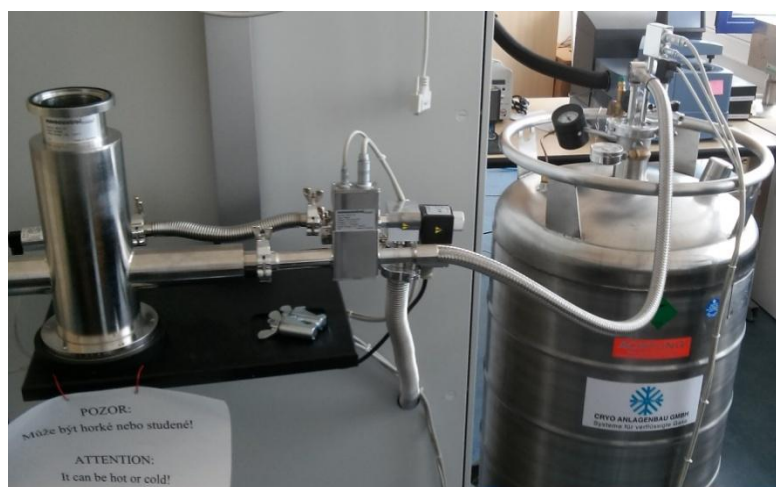


a)



b)

Obr. 2.2.2 Elektrodotový systém ZGS Alpha Active Sample Cell a) v celku, b) detail elektrodotového systému



Obr. 2.2.3 Systém Quatro Cryosystem



a)



b)

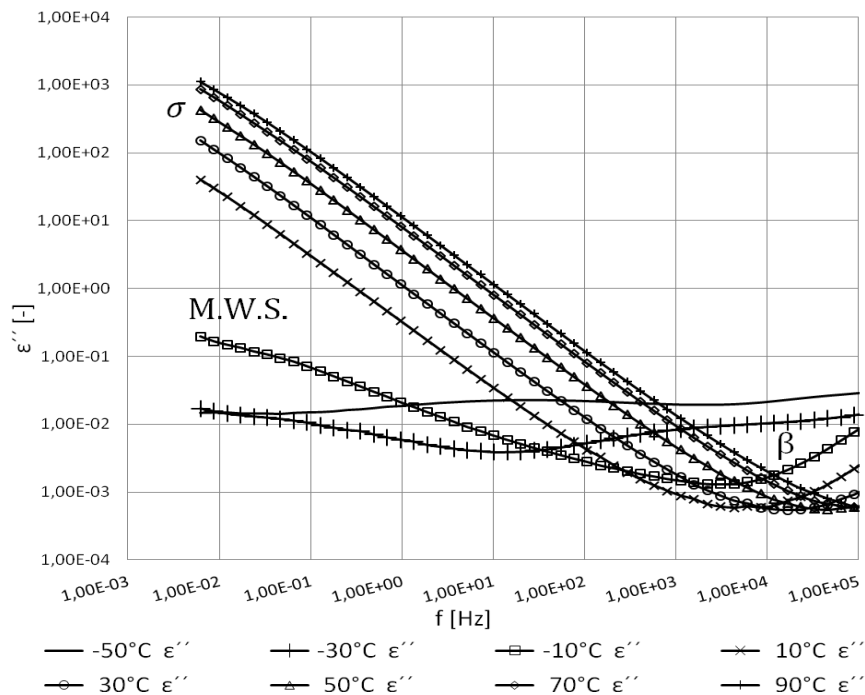
Obr. 2.2.4 Celkové umístění přístrojů a) bez vloženého elektrodového systému ZGS v kryostatu, b) s vloženým elektrodovým systémem ZGS v kryostatu

### 2.3 Výsledky měření

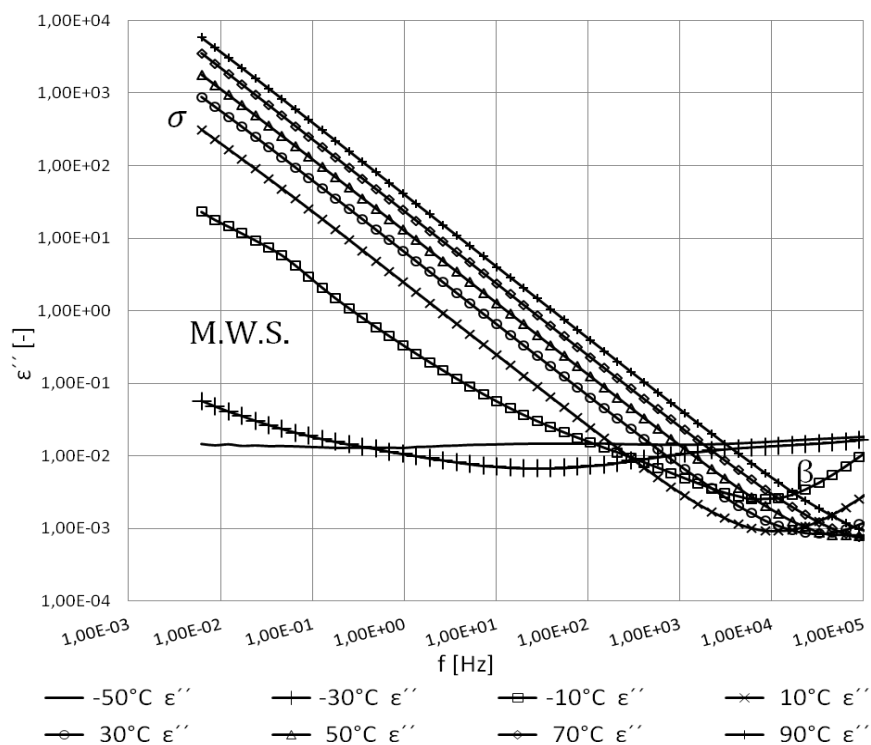
Obr. 2.3.1 – 2.3.3 znázorňují závislost imaginární složky komplexní permitivity měřených olejů na frekvenci a teplotě. Diagramy ukazují přibližná místa výskytu  $\beta$ -polarizace, Maxwell-Wagner-Sillars polarizace (v grafech pod označením M.W.S.) a stejnosměrné vodivé složky  $\sigma$ . Z diagramů je zřejmé, že imaginární složka komplexní permitivity u běžně užívaného transformátorového minerálního oleje (obr. 2.3.3) je obecně nižší než imaginární složka komplexní permitivity u slunečnicového a řepkového oleje (obr. 2.3.1 a 2.3.2). Je to způsobeno skutečností, že měřený běžně užívaný transformátorový minerální olej patří do skupiny naftenových olejů, jejichž základní složkou jsou cykloalkany [21]. Cykloalkany jsou méně polarizovatelné než triglyceridy a mastné kyseliny v rostlinných olejích. Rostlinné oleje jsou složeny hlavně z esterů. Pohyblivost esterů je vyšší, než je tomu u cykloalkanů, a také viskozita rostlinných olejů je nižší. Viskozita média významně ovlivňuje celkovou velikost imaginární složky komplexní permitivity. [18, 22]

$\beta$ -polarizace (obr. 2.3.1 – 2.3.3) je pravděpodobně způsobena u měřeného běžně užívaného transformátorového minerálního oleje pohybem cykloalkanů a u měřených rostlinných olejů pohybem triglyceridů. Maxwell-Wagner-Sillars polarizace je výraznější u běžně užívaného transformátorového minerálního oleje než u rostlinných olejů (obr. 2.3.1 – 2.3.3), protože vnitřní struktura tohoto oleje pravděpodobně umožňuje nosičům volného náboje vyšší pravděpodobnost zachycení na nehomogenitách. Stejnoseměrná vodivostní složka (obr. 2.3.1 – 2.3.3) se výrazně zvyšuje s teplotou od určité frekvence. Je to způsobeno skutečností, že s rostoucí teplotou vznikají nové nosiče náboje, které jsou zodpovědné za elektrickou vodivost. Tyto iontové nosiče elektrického náboje jsou produkovány pravděpodobně disociací pevných látek (nečistot), které jsou v olejích obsaženy [18, 22-24]. Vliv obsahu vody v olejích na vodivostní složku je pravděpodobně mizivý, protože oleje byly před měřením sušeny [25].

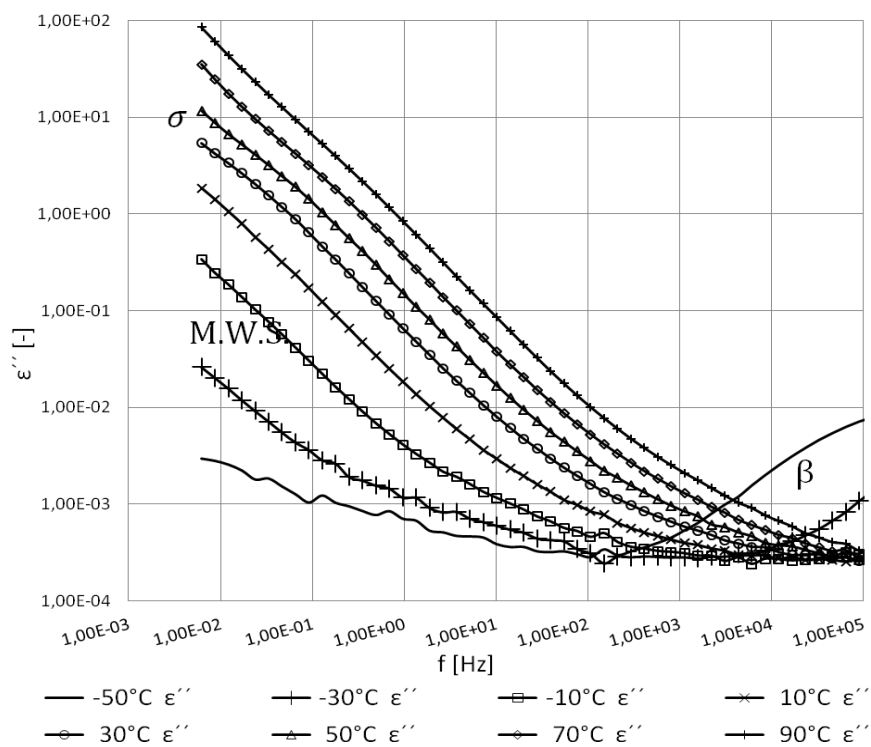
Obr. 2.3.1 a 2.3.2 ukazují, že při teplotách  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  molekuly rostlinných olejů jsou téměř zatuhlé a není viditelný téměř žádný relaxační mechanismus. Nízké teploty se projeví i v malé pohyblivosti volných nosičů elektrického náboje, což vede k nízkému podílu Maxwell-Wagner-Sillars polarizace a stejnosměrné vodivostní složky na celkové velikosti imaginární složky komplexní permitivity. Obecné pravidlo říká, že se zvyšující se teplotou jsou relaxační procesy zrychlovány [22].



Obr. 2.3.1 Závislost imaginární složky komplexní permitivity na frekvenci při různých teplotách u slunečnicového oleje



Obr. 2.3.2. Závislost imaginární složky komplexní permitivity na frekvenci při různých teplotách u řepkového oleje



Obr. 2.3.3 Závislost imaginární složky komplexní permitivity na frekvenci při různých teplotách u běžně užívaného transformátorového minerálního oleje

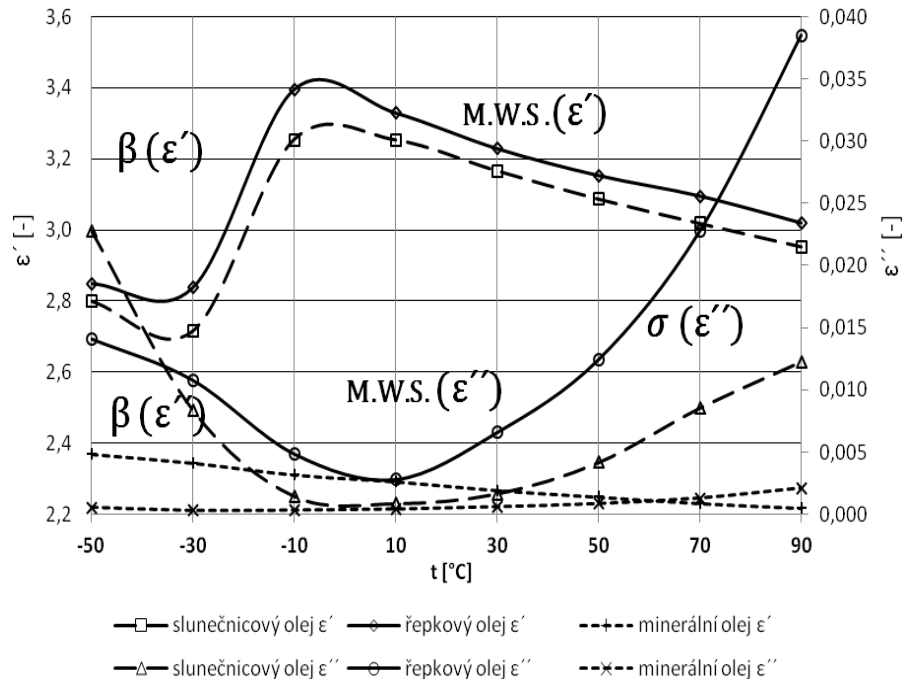
Závislost imaginární složky komplexní permitivity hodnocených olejů na teplotě a frekvenci 1000 Hz je znázorněna v obr. 2.3.4 a 2.3.5. Oblasti  $\beta$ -polarizace, Maxwell-Wagner-Sillars polarizace a stejnosměrné vodivé složky  $\sigma$  jsou v grafech vyznačené.

Rozdíl v chemickém složení měřených olejů významně ovlivňuje jejich imaginární složku komplexní permitivity, proto tyto hodnoty jsou mnohem nižší u běžně užívaného transformátorového minerálního oleje než u oleje slunečnicového a řepkového (obr. 2.3.4). Obr. 2.3.4 a 2.3.5 se snaží poukázat na spojitost mezi změnami imaginární složky komplexní permitivity a reálné složky komplexní permitivity. Grafy zřetelně ukazují, že k největší změně imaginární složky komplexní permitivity dochází v oblasti  $\beta$ -polarizace a vodivostní složky. V oblasti  $\beta$ -polarizace je přibližně od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  vnitřní tření v řepkovém a slunečnicovém oleji sníženo a natáčení molekul do směru vnějšího střídavého pole se stává snazším, což od určité teploty vede ke zvýšení imaginární složky komplexní permitivity [24]. V tomto teplotním rozpětí nebyly u měřeného běžně užívaného transformátorového minerálního oleje tyto změny zaznamenány. Avšak molekuly jsou vystaveny nejen vlivu teploty, ale také působení střídavého elektrického pole, a proto imaginární složka komplexní permitivity začíná od určitého bodu klesat (přibližně od  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro řepkový a slunečnicový olej a od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro běžně užívaný transformátorový minerální olej), kdy teplotní pohyb molekul začíná převažovat nad organizovanou polarizací střídavým elektrickým polem.

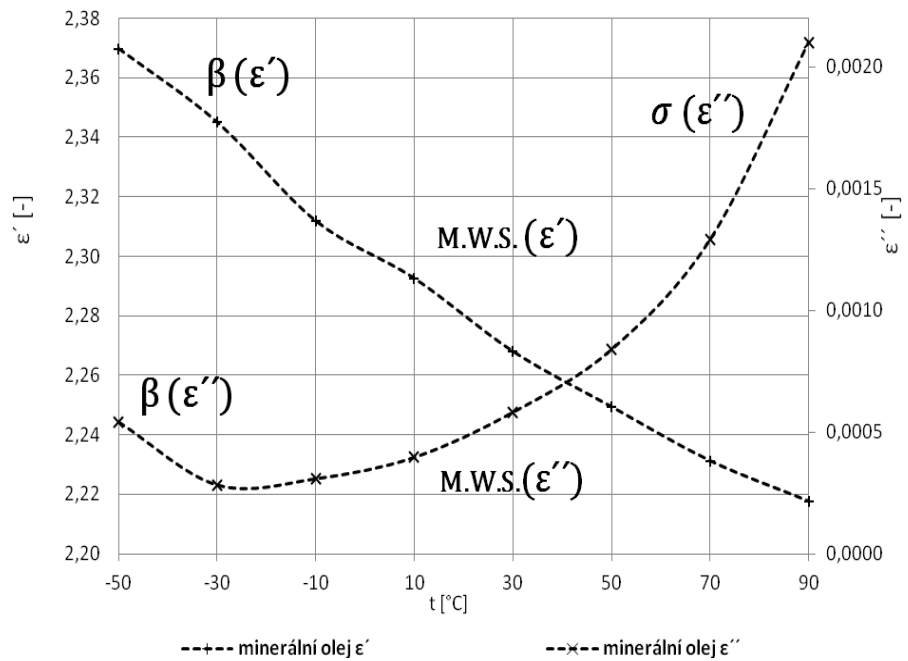
Hodnoty imaginární složky komplexní permitivity u slunečnicového oleje jsou nižší (obr. 2.3.1 a 2.3.4) než u řepkového oleje (obr. 2.3.2 a 2.3.4). Důvodem je pravděpodobně to, že slunečnicový olej obsahuje menší molekuly ve srovnání s řepkovým olejem a že orientace těchto molekul je snazší s rostoucí frekvencí. Jak ukazuje obr. 2.3.4, hodnota imaginární části komplexní permitivity u slunečnicového oleje je okolo  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  vyšší než u oleje řepkového. Důvodem je pravděpodobně to, že množství nenasycených mastných kyselin ve slunečnicovém oleji je v slunečnicovém oleji vyšší než v řepkovém oleji, a proto jeho molekuly zůstávají pohyblivější i při nižších teplotách ve srovnání s olejem řepkovým [20].

Jak bylo uvedeno výše, reálná a imaginární složka komplexní permitivity u běžně užívaného transformátorového minerálního oleje je mnohem nižší než u olejů rostlinných. Z tohoto důvodu jsou jejich vztahy pro měřený běžně užívaný transformátorový minerální olej ukázány samostatně v různých měřících (obr. 2.3.5). Na diagramech je vidět zřetelný směr Maxwell-Wagner-Sillars polarizace, protože vnitřní struktura tohoto oleje pravděpodobně umožňuje volným nosičům náboje během jejich pohybu vyšší pravděpodobnost zachycení než je tomu u olejů rostlinných.





Obr. 2.3.4 Závislost reálné a imaginární složky komplexní permitivity u měřených rostlinných olejů na teplotě při frekvenci 1000 Hz



Obr. 2.3.5 Závislost reálné a imaginární složky komplexní permitivity u běžně užívaného transformátorového minerálního oleje na teplotě při frekvenci 1000 Hz

Výsledky ukázaly, že vyhodnocované dielektrické vlastnosti měřených rostlinných olejů v řešeném frekvenčním a teplotním spektru jsou podobné, ale výrazně se liší od vyhodnocovaných dielektrických vlastností měřeného běžně používaného transformátorového minerálního oleje. Pro elektroizolační účely má měřený běžně užívaný transformátorový minerální olej mnohem lepší vlastnosti než měřené oleje rostlinné. [26-28]

## Závěr

Cílem této bakalářské práce je shrnutí základních vlastností kapalných dielektrik, jejich použití v praxi a v neposlední řadě vyhodnocení výsledků měření tří druhů olejů při využití metody dielektrické spektroskopie. V úvodu jsou popsány hlavní požadavky na kapalná dielektrika pro využití v energetice a jejich hlavní výhody. V teoretické části je uvedeno obecné rozdělení dielektrik z hlediska skupenství, dále následuje popis rozdělení kapalných dielektrik podle polárnosti, což je vlastnost, která popisuje strukturu látky a její chování bez nebo s připojením vnějšího elektrického pole. S tím souvisí i popis principu polarizace látek a druhy polarizačních mechanismů. Neméně důležitou částí je zmínka o vodivosti dielektrik a jejich ztrátách, což jsou důležité aspekty při navrhování použití kapalných dielektrik. Pro správnou funkci dielektrického systému je bezesporu důležité provádět diagnostiku kapalných dielektrik, a to jak při jejich vývoji a výrobě, tak při jejich provozu z pohledu vlivu kvality dielektrik na životnost a spolehlivost elektrických zařízení. Na konci části zabývající se základními aspekty fyziky kapalných dielektrik je zmínka o budoucnosti kapalných dielektrik, a proč je důležité se zabývat výzkumem nových materiálů, které by mohly nahradit současné a v největší míře používané minerální oleje, jinými podobně kvalitními kapalinami pro využití v elektroenergetice. Minerální oleje mají totiž dvě zásadní nevýhody. Minerální oleje jsou vysoce hořlavé a z hlediska životního prostředí velmi nebezpečné, vzhledem k jejich špatné biologické odbouratelnosti.

Úkolem měření vybraných dielektrických parametrů bylo porovnat chemickou strukturu a změny reálné složky komplexní permitivity odpovídající stupni dielektrické polarizace a imaginární složky komplexní permitivity odpovídající dielektrickým ztrátám běžně užívaného transformátorového minerálního oleje se slunečnicovým a řepkovým olejem (rostlinnými oleji) v závislosti na teplotě a frekvenci. Dva relaxační procesy (Maxwell-Wagner-Sillars polarizace a stejnosměrná vodivá složka  $\sigma$ ) byly pozorovány u všech tří olejů. Mechanismus  $\beta$ -polarizace je založen na působení dipólové polarizace a mechanismus Maxwell-Wagner-Sillars polarizace je způsoben shromažďováním nosičů náboje v určitých rozhraních s odlišnými dielektrickými vlastnostmi. Vodivostní složka je způsobena pohybem volných nosičů náboje (iontů). Hodnocený běžný transformátorový minerální olej má reálnou a imaginární složku komplexní permitivity mnohem nižší než rostlinné oleje. Pouze slunečnicový olej (obr. 2.3.4 a 2.3.6) má imaginární složku komplexní permitivity téměř stejnou jako transformátorový minerální olej, a to mezi teplotami  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výsledky měření ukázaly, že zkoumané rostlinné oleje nemohou být použity jako alternativní izolační

kapalina např. do silových transformátorů místo minerálních olejů, protože jejich vlastnosti neodpovídají požadovaným parametrům pro tento typ elektrického zařízení.

Jak již bylo zmíněno, největší nevýhodou minerálních olejů je jejich hořlavost, výbušnost a rizika pro životní prostředí. Výzkum tekutin by se tedy měl zaměřit na hledání olejů s podobnými nebo lepšími izolačními vlastnostmi, jako mají minerální oleje a s podobnou nebo lepší odolností vůči hoření a biologickou rozložitelností jako mají rostlinné oleje. Jedním z řešení by mohl být výzkum a využití přizpůsobených (upravených) směsí rostlinných a minerálních olejů s vhodnými aditivami, např. inhibitory, které by zlepšily negativní vlastnosti rostlinných a minerálních olejů. Tímto způsobem by bylo možné dosáhnout výhod olejů minerálních a rostlinných v jednom oleji.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] MENTLÍK, V. a kol. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN-technická literatura, 2008, 438 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] KUČEROVÁ, E. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-708-2940-0.
- [4] KUBALÍK, J.; STEJSKAL, M. Perspektivy v oblasti kapalných izolantů. MENTLÍK, V. Diagnostika07.
- [5] SPOHNER, M. Diagnostika perspektivních elektroizolačních kapalin. 2011. PhD Thesis. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39948](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39948)
- [6] FOFANA I. 50 Years in Development of Insulating Liquids. Electrical Insulation Magazine, 29 (5) 2013, 13-25.
- [7] HASSDENTEUFEL, J. a kol. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967. 680 s.
- [8] JANOUUD. Elektroizolační materiály – izolanty a dielektrika. Janoud.cz [online]. 2005 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: [http://janoud.cz/sub/jcueltech/04b\\_izolanty.pdf](http://janoud.cz/sub/jcueltech/04b_izolanty.pdf)
- [9] KUBALÍK, J. a STEJSKAL, M. Perspektivy v oblasti kapalných izolantů. <http://ketsrv.fel.zcu.cz/> [online]. 2009 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/105.pdf>
- [10] DIELEKTRIKUM. <http://cs.wikipedia.org/> [online]. 2013 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>
- [11] FRYBERT, J. Počítačové modelování a analýza dielektrických spekter. In: Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno, 2010 [cit.2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28646](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28646)
- [12] NOVOCONTROL TECHNOLOGIES GMBH & CO. KG. [Www.novocontrol.de](http://www.novocontrol.de) [online]. [cit. 2015-03-25].
- [13] MENTLÍK, V. Elektrotechnické materiály. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 133 s. ISBN 80-7082-227-9.
- [14] ŠAVEL, J. Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 314 s. ISBN 80-7300-190-2.

- [15] LIPTÁK, J. a SEDLÁČEK, J. Úvod do elektrotechnických materiálů. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 168 s. ISBN 80-01-03191-8
- [16] KREMER, F., SCHÖNHALS A. Broadband Dielectric Spectroscopy. New York: Springer, 2003. ISBN 978-3-540-43407-8.
- [17] 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.
- [18] ABDELMALIK A. A., FOTHERGILL J. C. and DODD S. J. Electrical Conduction and Dielectric Breakdown Characteristics of Alkyl Ester Dielectric Fluids obtained from Palm Kernel Oil. Dielectrics and Electrical Insulation, 19 (5) 2012, 1623-1632.
- [19] JAMIESON G. S. and BAUGHMAN W. F. The Chemical Composition of Sunflower-Seed Oil. Journal of the American Chemical Society, 44 (12) 1922, 2952-2957.
- [20] SPOHNER M., FRK M., LIEDERMANN K. Study of Electrical and Rheological Properties of Natural and Other Oils, Conference: Electrical Insulation (ISEI), 2012, 30-33.
- [21] SHAH Z. H. and TAHIR Q. A. Dielectric Properties of Vegetable Oils, Journal of Scientific Research, 3 (3) 2011, 481-492.
- [22] ABDELMALIK A. A. Charge Dynamics in Vegetable Oil-Based Ester Dielectric Fluid, British Journal of Applied Science & Technology, 4 (2) 2014, 371-386.
- [23] PARASKEVAS C. D., VASSILIOU P., and DERVOS C. T. Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy in Frequency Domain of High-Voltage Transformer Oils Compared to Physicochemical Results, Dielectrics and Electrical Insulation, 13 (3), 2006, 539-546.
- [24] PECOVSKA-GJORGJEVICH M., ANDONOVSKI A., VELEVSKA J. Dielectric Constant and Induced Dipole Moment of Edible Oils Subjected to Conventional Heating, Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 31 (2), 2012, 285-294.
- [25] FOLGERØ K. Broad-Band Dielectric Spectroscopy of Low-Permittivity Fluids Using One Measurement Cell, Instrumentation and Measurement, 47 (4), 1998, 881-885.
- [26] TRNKA P., MENTLÍK V. and ČERNÝ J. Electroinsulating Fluids-New Insulating Mixtures, Conference: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011, 575-578.
- [27] BOSS P., OOMMEN T. V. New Insulating Fluids for Transformers Based on Biodegradable High Oleic Vegetable Oil and Ester Fluid, Conference: Insulating Liquids, 1999, 1-10.

- [28] BORIS H., GOCKENBACH E., DOLATA B. Ester Fluids As Alternative for Mineral Based Transformer Oil, Conference: Dielectric Liquids (ICDL), 2008, 1-4.