

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

Diplomová práce

Elektroizolační kapaliny

vedoucí práce: doc. Ing. Pavel TRNKA Ph.D.

autor: Bc. Vojtěch SMETANA

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch SMETANA**
Osobní číslo: **E12N0150P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Elektroizolační kapaliny**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište dielektrické a elektrické jevy probíhající v elektroizolačních kapalinách
2. Popište degradační jevy v elektroizolačních kapalinách
3. Stanovte u konkrétních typů kapalin jejich biodegradabilitu
4. Popište způsob získávání jednotlivých typů kapalin s ohledem na poměry v ČR
5. Proveďte elektrické zkoušky různých kapalin a vyhodnoťte jejich vhodnost pro konkrétní účely



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. Mentlík V., Trnka P., Trnková M., Šašek L., Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, 2011, 120 s., ISBN 978-80-7300-412-5.
2. Mentlík, V., Polanský, R., Pihera, J., Prosr, P., Trnka, P.: Diagnostika elektrických zařízení, ISBN 978-80-7300-232-9, BEN technická literatura Praha 2008.
3. Elektronické informační zdroje

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt**Smetana, V.****Elektroizolační kapaliny**

Předmětem předkládané diplomové práce jsou elektroizolační kapaliny. Práce je rozdělena na část teoretickou, kde je v několika bodech popsána problematika izolačních kapalin a část experimentální, jejímž předmětem je proměření charakteristických vlastností transformátorových olejů. V prvních několika bodech jsou shrnuty charakteristické fyzikální vlastnosti dielektrických prvků. Poté jsou uvedeny některé degradační mechanismy, které se u kapalin projevují. Další odstavce přibližují problematiku spojenou s biologickou odbouratelností a způsoby získávání jednotlivých druhů kapalin s ohledem na poměry v ČR. Závěr práce se věnuje experimentům, a to zejména měření permitivity, ztrátového činitele a průrazného napětí.

Klíčová slova

ztrátový činitel, permitivita, biodegradabilita, průrazné napětí, transformátorový olej

79 stran

41 obrázků

10 tabulek

10 stran příloh

Abstract**Smetana, V.****Electrical Insulating Fluids**

The subject of the thesis is electrical insulating liquids. Thesis is divided into a theoretical part where at several points discussed issues of insulating liquids and part experimental, which focus on measuring characteristics of transformer oil. The first few points are summarized physical characteristics of the dielectric elements. Then there are some degradation mechanisms that are reflected in liquids. Another paragraph identifies the issues associated with biodegradability and ways of acquiring various kinds of liquids with regard to the situation in the Czech Republic. Conclusion of thesis is dedicated to experimentation, especially measuring permittivity, dissipation factor and breakdown voltage.

Key words

dissipation factor, permittivity, biodegradability, breakdown voltage, transformer oil

79 pages

41 pictures

10 tables

10 pages of appendices

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 20. dubna 2014

.....

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat dalším členům katedry technologií a měření, kteří napomáhali vzniku této práce.

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam symbolů a zkratk | 9 |
| 1 Úvod | 11 |
| 2 Elektrické a dielektrické jevy v elektroizolačních kapalinách..... | 13 |
| 2.1 Polarizace..... | 13 |
| • Deformační polarizace..... | 15 |
| • Relaxační polarizace | 16 |
| 2.2 Dielektrikum v elektrostatickém poli | 19 |
| 2.3 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli..... | 20 |
| 2.4 Elektrická vodivost dielektrika | 22 |
| 2.5 Dielektrické ztráty..... | 25 |
| 2.6 Elektrická pevnost..... | 28 |
| 3 Degradální jevy v elektroizolačních kapalinách..... | 31 |
| 3.1 Teplota..... | 31 |
| 3.2 Elektrické pole | 34 |
| 3.3 Klimatické podmínky | 37 |
| • vlhkost..... | 37 |
| • záření | 39 |
| 4 Biodegradabilita transformátorových olejů | 41 |
| 4.1 Metody testování | 42 |
| 4.2 Postup zkoušení a praktická zkouška | 42 |
| 5 Způsob získávání izolačních kapalin s ohledem na poměry v ČR..... | 46 |
| 5.1 Minerální oleje..... | 46 |
| 5.2 Rostlinné oleje | 48 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.3 | Syntetické elektroizolační kapaliny | 48 |
| 6 | Elektrické zkoušky izolačních kapalin | 51 |
| 6.1 | Standardizace (normy) | 51 |
| 6.2 | Měření $\tan \delta$, ϵ_r | 51 |
| | • Scheringův můstek | 51 |
| | • porovnání s dielektrickou spektroskopií..... | 58 |
| 6.3 | Měření průrazného napětí | 63 |
| 6.4 | Vliv vlhkosti na parametry elektroizolačních kapalin | 66 |
| 7 | Závěr..... | 73 |
| 8 | Použitá literatura..... | 75 |
| | Přílohy..... | 79 |

Seznam symbolů a zkratk

| | | | |
|----------------------------|---|------------------------|-----------------------|
| q | elementární náboj | $1,602 \cdot 10^{-19}$ | [C] |
| γ | konduktivita, měrná elektrická vodivost | | [S/m] |
| τ | časová konstanta | | [s] |
| \vec{P} | vektor polarizace | | [C/m ²] |
| ε_0 | permitivita vakua | $8,854 \cdot 10^{-12}$ | [F/m] |
| ε_r | relativní permitivita – materiálová konstanta | | [-] |
| n | počet částic na jednotku objemu | | [-] |
| ν | teplota | | [°C] |
| ω | úhlová rychlost | | [rad/s] |
| D | elektrická indukce | | [C/m ²] |
| α | polarizovatelnost | | [F.m ²] |
| $\vec{\mu}$ | indukovaný dipólový moment | | [C.m] |
| \vec{E} | intenzita elektrického pole | | [V/m] |
| ε_s | statická relativní permitivita | | [-] |
| $\operatorname{tg} \delta$ | ztrátový činitel | | [-] |
| U | elektrické napětí | | [V] |
| T | teplota | | [°C] |
| ε' | reálná složka komplexní permitivity | | [-] |
| ε'' | imaginární složka komplexní permitivity | | [-] |
| ρ | rezistivita | | [Ω.m] |
| R | elektrický odpor | | [Ω] |
| S | plocha | | [m ²] |
| h, d | vzdálenost | | [m] |
| η | dynamická viskozita | | [N.s/m ²] |
| P_{ZSS} | ztrátový výkon | | [W] |
| C | kapacita | | [F] |
| E_p | elektrická pevnost | | [kV/mm] |
| U_p | průrazné napětí | | [kV] |
| λ | vlnová délka | | [μm] |
| PB | biologická rozložitelnost | | [%] |

| | | |
|------|--|--------------|
| P | zbytkový obsah látky na referenčním vzorku | [mg] |
| T | zbytkový obsah látky na testovaném vzorku | [mg] |
| BOD | biochemická spotřeba kyslíku | [mg] |
| ThOD | teoretická spotřeba kyslíku | [mg] |
| t | čas | [hod] |
| f | frekvence | [Hz] |
| PCB | Polychlorovaný bifenyly | |
| PCT | Polychlorovaný terfenyl | |
| Qv | obsah vody v oleji | [ppm; mg/kg] |

1 Úvod

Na úvod této práce je vhodné jasně vymezit pojmy a definice, kterými se tato práce zabývá.

Materiály používané v elektrotechnice lze klasifikovat několika způsoby:

- strukturou
- skupenstvím
- nosiči náboje

Nejdůležitějším parametrem pro dělení látek používaných v elektrotechnice je klasifikace dle přítomnosti nosičů náboje. Ty se mohou v látce vyskytovat ve dvou formách. Jako volné náboje označujeme částice takové, které nesou elementární náboj q , a zároveň se mohou pohybovat v rámci materiálu. Vázané nosiče náboje se touto vlastností nevyznačují a jsou pevně vázány ve svých rovnovážných polohách [1, s.10].

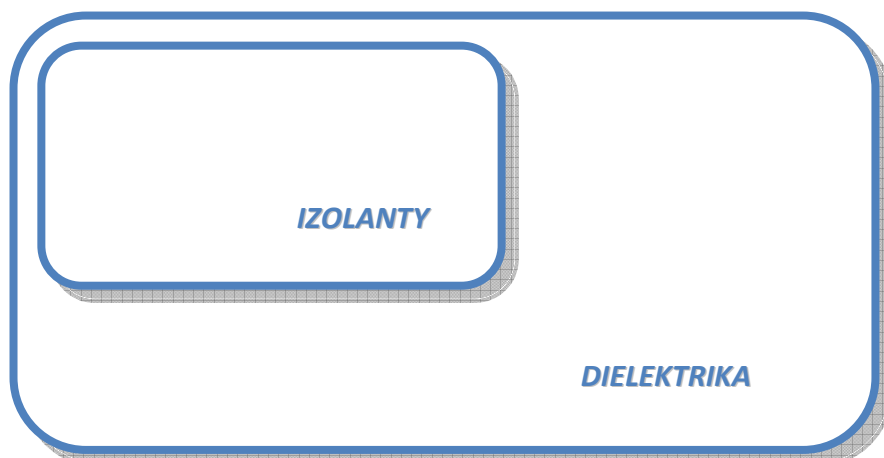
Pro další dělení je rozhodující chování látek po jejich vložení do elektrického pole. Toto chování odpovídá koncentraci výše uvedených nosičů a také jejich typu [1, s.10]. Elektrotechnické materiály jsou rozděleny podle množství volných nosičů náboje, což odpovídá jejich měrné elektrické vodivosti γ .

- vodiče $\gamma > 10^5$ [S/m]
- polovodiče $10^{-8} < \gamma < 10^5$ [S/m]
- izolanty $\gamma < 10^{-9}$ [S/m]

V praxi není možné uvažovat ideální izolant, tedy takový, který by neobsahoval žádné volné nosiče náboje. Naopak reálný izolant je látka nebo materiál, který vždy vykazuje nějakou vodivost [1, s.10], [3, s.336].

Dále by měla být objasněna problematika dielektrika. Tento pojem je často chybně zaměňován s pojmem izolant. Dielektrikum je látka, která se vyznačuje schopností polarizace po vložení do elektrického pole, tím se rozumí schopnost vytvoření vlastního elektrického pole. Naproti tomu izolantem je materiál, který se vyznačuje schopností zabraňovat průchodu elektrického proudu. Izolanty jsou podmnožinou dielektrik, a proto každý izolant

je dielektrikem, avšak dielektrikum není zákonitě izolantem [1, s.10]. Tuto problematiku blíže přibližuje následující obrázek (Obr. 1.1).



Obr. 1.1 - Vymezení pojmů dielektrikum a izolant - převzato z [1, s.12]

2 Elektrické a dielektrické jevy v elektroizolačních kapalinách

U izolačních materiálů je možné sledovat několik charakteristických vlastností a jevů. Nejpočetnější skupinu tvoří polarizace. Další části této kapitoly se poté zabývají elektrickou vodivostí, dielektrickými ztrátami a elektrickou pevností dielektrických látek.

2.1 Polarizace

Jedná se interakci elektrického pole a látky, při umístění dané látky do vnějšího elektrického pole. Při tomto jevu uvnitř látky probíhají určité fyzikální pochody, které jsou závislé na vnitřní stavbě a struktuře materiálu, zejména na tom, zda se jedná o látku polární či nepolární (*viz. následující odstavce*). Na polarizaci lze také nahlížet ze dvou možných hledisek [1, s.16], [3, s.338].

Makroskopický pohled

Pokud uvažujeme tento případ, tak na dielektrikum nahlížíme jako na celek a hodnotíme pouze výsledek polarizace. Očekávaným výsledkem je vznik vázaného elektrického náboje na povrchu dielektrika [1, s.22].

Mikroskopický pohled

Na rozdíl od předchozího odstavce v tomto případě uvažujeme dielektrikum jako systém, který se skládá z několika podružných elementů, kterými jsou nosiče náboje. Tento pohled se tedy zabývá nikoli celkem, ale strukturou daného dielektrika. Výsledkem polarizace dielektrika z mikroskopického hlediska je orientace stávajících nebo vznik nových dipólových momentů [1, s.22].

V případě této práce je problematika prezentována pouze zjednodušeným způsobem, který slouží pro snadné pochopení dané oblasti. Detailnější pohled na makroskopické i mikroskopické hledisko polarizací poskytuje autor [1].

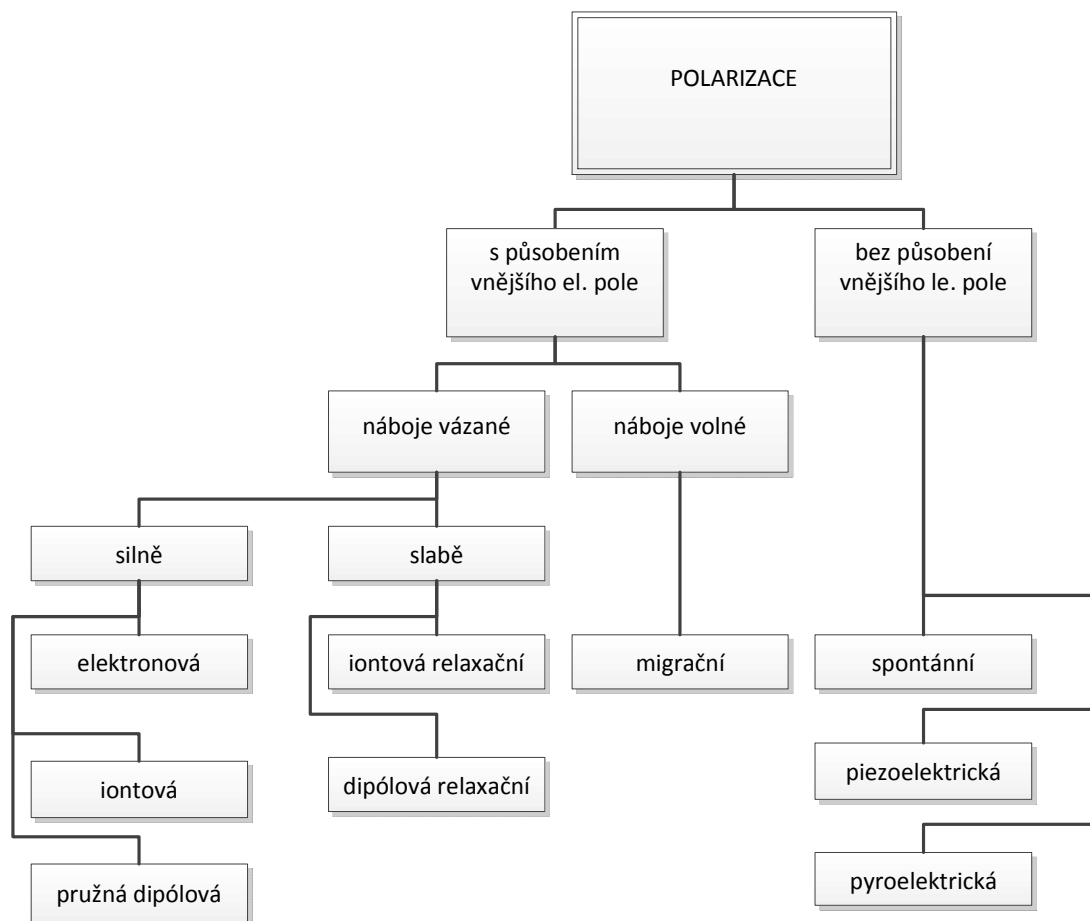
Polárnost látek

V nepolárním dielektriku při působení polarizačního efektu, tedy při vložení materiálu do elektrického pole, působí na atomy nebo molekuly daného materiálu přitažlivé

nebo odpudivé síly, které přemění tyto částice na tzv. elektrické dipóly. Tím dochází k nesymetrickému rozložení částic uvnitř struktury. Po odstranění elektrického pole elektrické dipóly zanikají a nosiče elektrického náboje putují na svoje původní pozice. Tento typ polarizace se nazývá atomovou.

Situace v případě polárních dielektrik je odlišná, jelikož již obsahují elektrické dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole. Uspořádání těchto dipólů je ale náhodné, resp. chaotické a k souhlasné orientaci dochází právě až po přiložení elektrického pole. Tento jev je nazýván polarizací orientační [1, s.22], [3, s.338].

Na následujícím obrázku (Obr. 2.1) lze pozorovat mechanismy a rozdělení polarizací probíhající v dielektriku.



Obr. 2.1 - Rozdělení polarizačních mechanismů - převzato z [1, s.28]

Na předchozím obrázku je možno pozorovat, že v dielektrických materiálech probíhá několik druhů polarizací. Následující text uvažuje pouze případy, které mohou nastat u izolačních kapalin, které jsou tématem této práce.

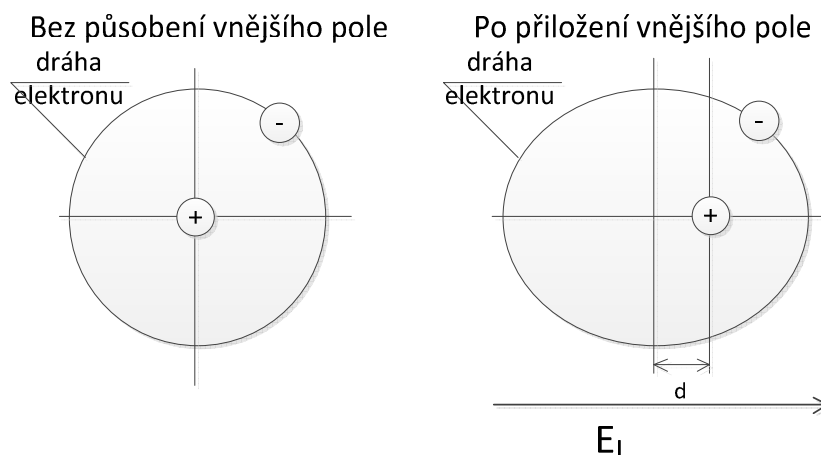
- **Deformační polarizace**

Nosičem náboje může být elektron, iont nebo dipól, který je umístěn ve vnitřní struktuře dané látky. Daný nosič je ve struktuře látky držen pevně, a proto vnější elektrické pole způsobí pouze minimální změnu vzdálenosti, která je obvykle menší než rozměry samotného atomu, přesto výsledkem může být značná změna permitivity dielektrika, jelikož toto pole současně ovlivní velký počet nosičů.

Následkem pevné vazby nosiče ve struktuře je krátký čas ustálení polarizace, tak jako následné navrácení do původní rovnovážné polohy. Dalším důsledkem je nezávislost na tepelném pohybu, tlaku a frekvenci a poslední výhodou této polarizace je bezztrátovost [1, s.30], [3, s.339], [6, s.15].

Elektronová deformační polarizace

Pokud není atom ve vnějším elektrickém poli, je těžiště kladného i záporného nosiče shodné, proto se zde nevyskytuje žádný dipólový moment. Naopak pokud atom vložíme do elektrického pole, tak na nosiče kladné a záporné působí síly v opačném směru, tím dojde k určitému posunutí těžišť jednotlivých nábojů a vzniku dipólového momentu (*Obr. 2.2*). Doba ustálení je poměrně vysoká ($\tau = 10^{-16}$ až 10^{-13} s). Jak již bylo zmíněno výše, jako všechny ostatní deformační polarizace je i tato polarizace bezztrátová. Pro běžné frekvenční rozsahy kmitočtově a také teplotně nezávislá. U kapalin se vyskytuje jak v látkách polárních tak nepolárních [1, s.30 - s.31], [3, s.337].



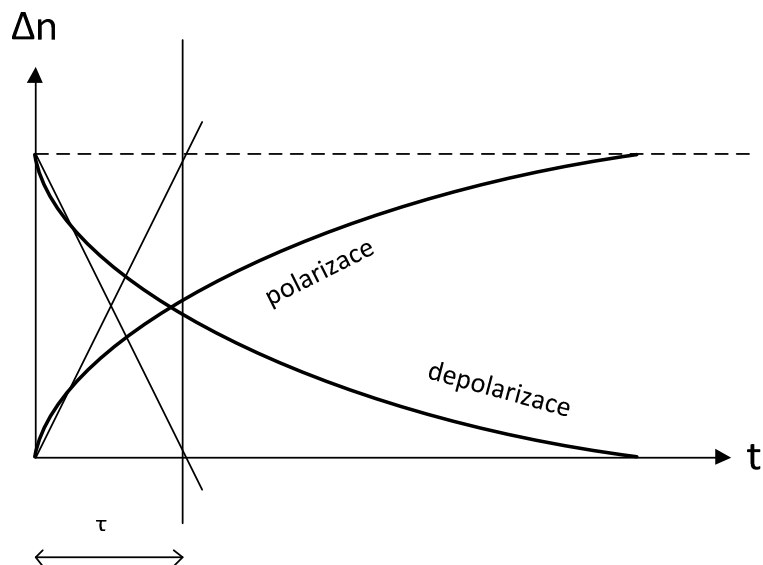
Obr. 2.2 . Schéma elektronové deformační polarizace - převzato z [1, s.31]

- **Relaxační polarizace**

Hlavní rozdíl oproti deformační polarizaci je rychlost. Tento typ polarizace je výrazně pomalejší. Druhým rozdílným parametrem je průběh polarizace, v tomto případě je charakteristickou vlastností relaxační pochod. V neposlední řadě je rozdílným parametrem také teplota, která v předchozím případě nevyvolává závislost, ale v případě relaxační polarizace je tepelný pohyb nosičů náboje rozhodující. Rozhodující hybnou silou celého mechanismu jsou slabě vázané částice - molekuly kapalných dielektrik. Bez dodání vnějšího elektrického pole nedochází k polarizaci, protože nosiče náboje jsou rozmístěny chaoticky a tudíž nedochází k nerovnoměrnému rozložení a tím ke vzniku momentu.

Přiložením elektrického pole se změní rozložení nosičů náboje, na nerovnoměrné rozložení, čímž vznikne určitý dipólový moment, označovaný jako relaxační polarizace. Přechod mezi dielektrikem nepolarizovaným a zpolarizovaným je popsán přechodovým dějem, proto nelze předpokládat, že okamžitě po přiložení elektrického pole je dielektrikum polarizováno. Čas potřebný k polarizaci je označován jako relaxační doba a celý průběh děje lze popsat exponenciální křivkou. Po odstranění elektrického pole je také návrat do výchozích poloh popsán přechodovým dějem. Oba průběhy lze sledovat na následujícím grafu (Obr. 2.3)

Již výše bylo zmíněno, že největším rozdílem je rychlost celého procesu. Nelze také opomenout další zásadní odlišnost, kterou je skutečnost, že se jedná o polarizaci ztrátovou [1, s.33], [3, s.340], [6, s.18].



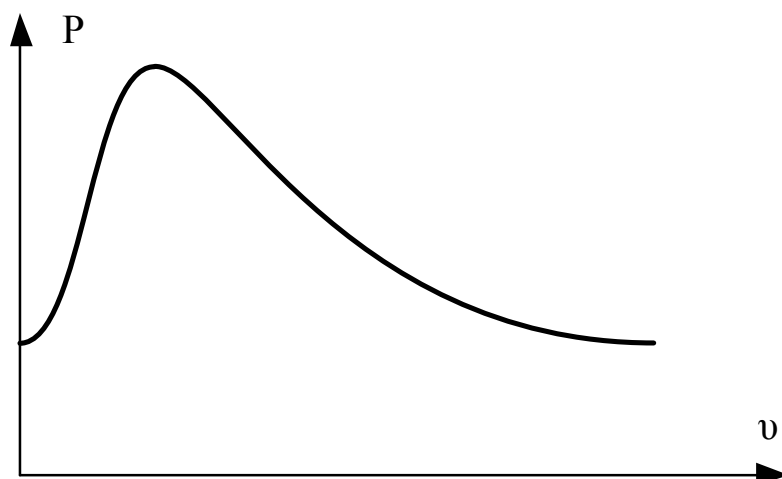
Obr. 2.3 - Časový průběh polarizace a depolarizace - převzato z [1, s.38]

Dipólová relaxační polarizace

Tato polarizace nastává u látek, jejichž dipólové molekuly jsou vázány slabě, a proto působením vnějšího elektrického pole dochází k natočení dipólů ve směru působícího elektrického pole. Proti natočení dipólu působí tepelný pohyb částic, z čehož plyne velká závislost na teplotě.

V případě, že nepůsobí vnější elektrické pole, je směr dipólových momentů neuspořádaný, a proto výsledný moment je nulový. Pokud, ale vložíme dielektrikum do vnějšího elektrického pole, mají elementární dipóly dvě možné orientace vůči směru elektrického pole. Přechod z jedné polohy s minimální energií do druhé znamená otočení dipólu o 180° . Při působení elektrického pole je pravděpodobnější souhlasná orientace dipólů se směrem elektrického pole, čímž dochází ke vzniku momentu z makroskopického hlediska.

Doba ustálení je o několik řádů pomalejší než v případě deformační polarizace ($\tau = 10^{-12}$ až 10^{-8} s). Na následujícím obrázku (Obr. 2.4) je zobrazena velmi silná závislost dipólové relaxační polarizace na teplotě.



Obr. 2.4 - Teplotní závislost dipólové relaxační polarizace- převzato z[1, s.40]

Tento typ polarizace je u kapalných izolantů zastoupen pouze polárními kapalnými dielektriky [1, s.39 - s.40], [3, s.338], [6, s.19].

2.2 Dielektrikum v elektrostatickém poli

V tomto bodě bude vysvětleno chování dielektrika při styku s elektrostatickým polem. K matematickému popisu procesu se využívá vhodná veličina – relativní permitivita – nejdůležitější technická charakteristika dielektrika [1, s. 49]. Pro další pochopení je potřeba definovat vztah mezi polarizovatelností a statickou relativní permitivitou, který lze vyjádřit z následujících rovnic (1) a (2).

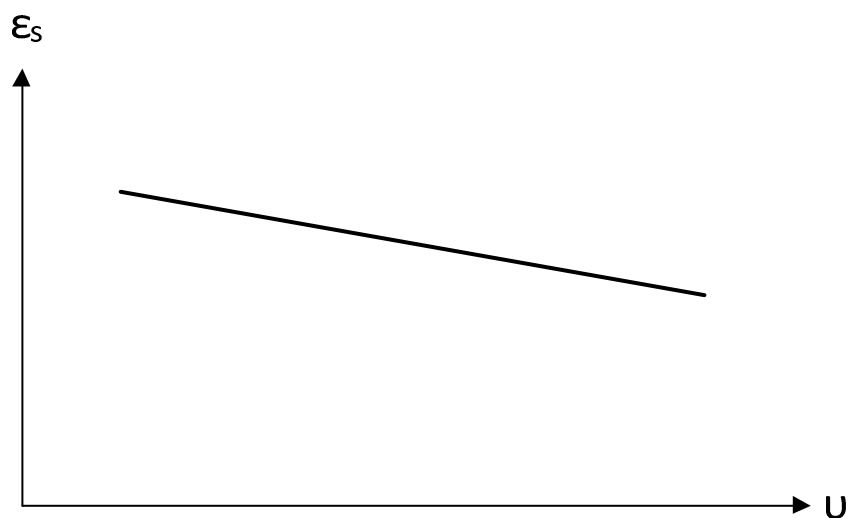
$$P = n \cdot \mu = n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_L \quad (1)$$

$$P = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot (\epsilon_s - 1) \quad (2)$$

Porovnáním těchto dvou vztahů dostáváme Clausiovu rovnici (3) [1, s.50]

$$P = n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_L = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot (\epsilon_s - 1) \quad (3)$$

Dalším důležitým poznatkem je skutečnost, že by se mohla tato veličina jevit jako materiálová konstanta. Ale není tomu tak, jelikož permitivita je značně závislá na teplotě a frekvenci jak ukazuje následující závislost (Obr. 2.5).



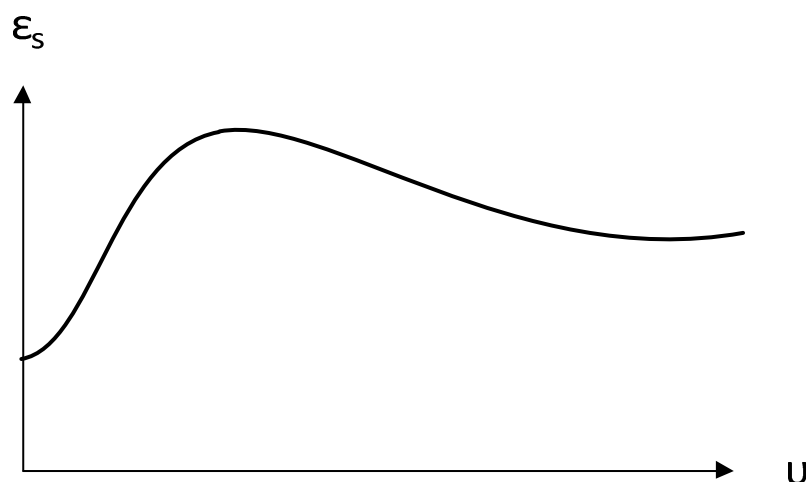
Obr. 2.5 - Závislost relativní statické permitivity nepolárních látek na teplotě - převzato z [1, s.51]

Relativní statická permitivita s rostoucí teplotou mírně klesá, což je způsobeno tím, že s rostoucí teplotou klesá hustota látky a tím klesá koncentrace polarizovaných částic [1, s.51].

V další části se budeme zabývat pouze situací, která může nastat u kapalných dielektrik, jelikož ty jsou hlavním tématem této práce.

V tomto případě se projevuje vliv silnějšího vzájemného působení molekul a lokální vnitřní pole již nelze vyjádřit elementární rovnicí [1, s.52]. Tento problém se snažilo vyřešit několik autorů, zmiňme například Debey, Onsanger a Kirwood.

Na dalším obrázku (Obr. 2.6) je zobrazena teplotní závislost statické relativní permitivity v celém rozsahu teplot. Ze závislosti je možné odečíst, že pokud se dielektrikum nachází v prostředí s dostatečně nízkou teplotou, projevuje se pouze polarizace deformační, což odpovídá průběhu charakteristiky nepolárních látek. Tento obrázek odpovídá skutečnému průběhu statické permitivity u kapalných izolantů.



Obr. 2.6 - Teplotní závislost statické relativní permitivity polárního kapalného dielektrika - převzato z [1, s.54]

2.3 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

Tento popis je na rozdíl od předchozího případu výrazně složitější, jelikož je nutné uvažovat zejména kinetické vlastnosti částic, které se projevují při namáhání dielektrika střídavým elektrickým polem. Hlavním rozdílem je fázový posuv obou vektorů, tj. vektor intenzity elektrického pole a vektor indukovaného dipólového momentu uvnitř dielektrika.

Proto je nutné pro popis dielektrika zavést frekvenčně závislou komplexní permitivitu (4) $\varepsilon^*(j\omega)$, pro kterou platí vztah:

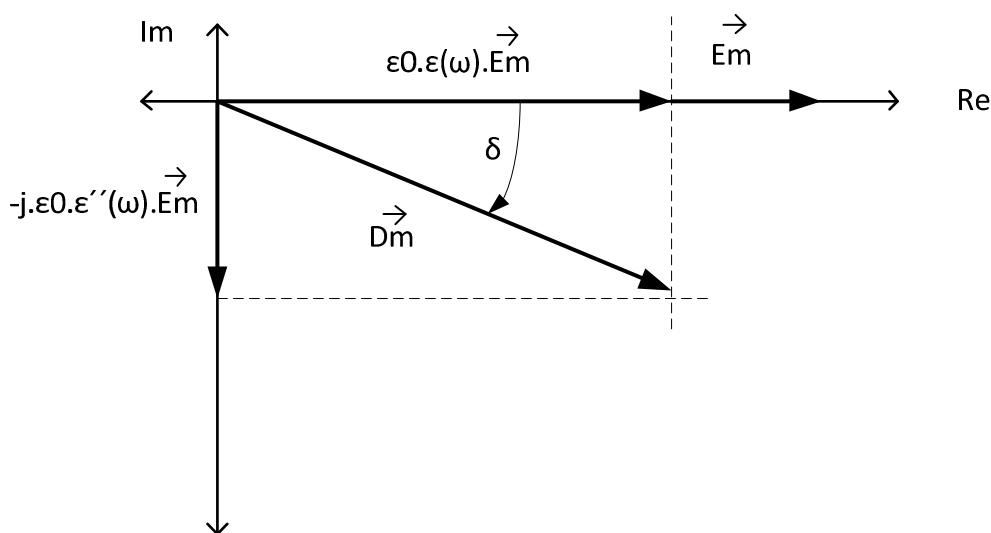
$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (4)$$

kde $\varepsilon'(\omega)$ a $\varepsilon''(\omega)$ jsou frekvenčně závislé reálná a imaginární část komplexní permitivity.

Reálná složka komplexní permitivity je tvořena vlastní relativní permitivitou a určuje kapacitní charakter dielektrika. Zároveň lze její význam chápat stejně jako permitivitu ϵ_s v případě dielektrika v elektrostatickém poli.

Naopak imaginární část určuje množství ztrát vzniklých v dielektriku ve střídavém elektrickém poli [1, s. 55, s.56], [4, s.7], [6, s.10].

Situaci graficky znázorňuje následující obrázek (Obr. 2.7).



Obr. 2.7 - Grafická interpretace komplexní relativní permitivity - převzato z [1, s.56]

Dalším důležitým poznatkem je rozdílnost této veličiny podle vlastností daných dielektrik.

U nepolárních látek obsahuje komplexní relativní permitivita pouze reálnou část. V případě látek polárních jsou však přítomny obě složky komplexní relativní permitivity. Dále je potřeba zavést další pojem, kterým je dielektrická relaxace, která sleduje skutečnost, že polarizační děj nemůže sledovat rychlé změny elektrického pole okamžitě a dochází k prodlevě, kterou nazýváme výše zmíněnou dielektrickou relaxací. Tento pojem zavedl Debey, jenž odvodil vztah platný pro slabě polární kapalná dielektrika (5).

$$\epsilon^*(j\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} \quad (5)$$

τ ... relaxační doba.

Imaginární část komplexní permitivity $\varepsilon''(j\omega)$ značí ztráty dielektrika ve střídavém elektrickém poli. Proto zavádíme další pojem - ztrátový činitel - $\operatorname{tg} \delta$ (6), který udává poměr mezi imaginární a reálnou částí komplexní relativní permitivity [1, s.56], [6, s.10].

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon''(\omega) \cdot \overline{E_m}}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega) \cdot E_m} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (6)$$

2.4 Elektrická vodivost dielektrika

Jak již z názvu plyne, tato vlastnost dielektrických materiálů je nežádoucím jevem. Naším požadavkem by byl technický izolant bez veškerých příměsí a nečistot a zároveň volných nosičů náboje, způsobujících elektrickou vodivost daného materiálu [1, s.69], [3, s.334].

Pro klasifikaci jednotlivých materiálů využíváme fyzikální veličinu – měrný elektrický odpor, též někdy označovanou jako rezistivitu. A měrnou elektrickou vodivost – konduktivitu. Mezi těmito jednotkami platí následující vztah (7).

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

Hodnotu těchto jednotek lze popsat následovně: **rezistivita ρ** je rovna odporu krychle daného materiálu o hraně 1 m, pokud mezi jejími 2 protilehlými stěnami protéká proud [1, s.70]. Pro daný vzorek, jehož pole je homogenní lze vyjádřit takto (8).

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \quad (8)$$

S ... plocha elektrod

h ... tloušťka vzorku

R ... hodnota změřeného izolačního odporu

Pro různé skupenství látek platí různé zákonitosti, proto je zde na místě zaměřit se pouze na problematiku kapalin. Nejvýraznější odlišností kapalin a plynů je vzdálenost molekul, v kapalném prostředí se molekuly vyskytují mnohem blíže k sobě. Při tomto uspořádání, které je mnohem koncentrovanější, dochází k ovlivňování jednotlivých molekul tzv. mezimolekulovými silami. Tato skutečnost vyúsťuje ve vznik nových a pevnějších

uspořádání – klastrů, které přesto nejsou stabilní a neustále mění svoji polohu. Tento fakt má za následek schopnost látek téct a měnit svůj tvar dle použité nádoby [1, s.79].

Už na úvod této kapitoly bylo zmíněno, že vodivost látek silně ovlivňuje množství příměsí a čistota kapaliny, proto se zavádí dva druhy kapalných izolantů podle čistoty kapaliny.

a) extrémně čisté kapalně izolanty

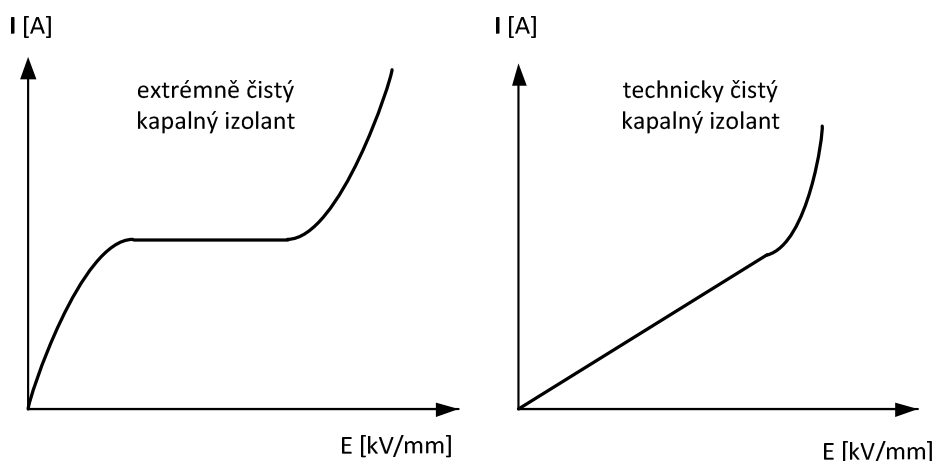
- jejich základní vlastností je velmi nízká hodnota konduktivity (10^{-14} až 10^{-15} S/m)
- volné nosiče vznikají ionizací, disociací, tepelnou excitací elektronů nebo emisí elektronů z katody
- jejich výroba se opírá hlavně o pečlivou rafinaci a následně dokonalé odplynění

b) technicky čisté kapalně izolanty

- hodnota konduktivity cca 10^{-11} až 10^{-12} S/m, kterou způsobuje zvýšená koncentrace volných nosičů náboje, které jsou silně závislé na druhu příměsí, velikosti částice a stupni disociace
- vyskytují se dva odlišné typy vodivosti:
 - iontová
 - elektroforetická

U kapalných izolačních materiálů se projevuje zejména vodivost elektroforetická, způsobená koloidními částicemi, které jsou volnými nositeli náboje.

Rozdílnost mezi čistotou izolačních kapalin je patrná na následující voltampérové charakteristice (*Obr. 2.8*).



Obr. 2.8 - Voltampérové charakteristiky extrémně a technicky čistých kapalných izolantů – převzato z [1, s.79]

Konduktivita kapalných izolantů je silně závislá na teplotě. Tuto skutečnost lze vysvětlit teplotní závislostí volných nosičů náboje v neideálním dielektriku. Dalším parametrem způsobujícím teplotní závislost je dynamická viskozita, která ovlivňuje volné nosičů náboje.

Vzájemný vztah obou veličin ukazuje následující rovnice (9), tzv. Waldenovo pravidlo.

$$\gamma \cdot \eta = \frac{n \cdot q^2}{l} \quad (9)$$

η ... dynamická viskozita

n ... koncentrace nosičů

q ... elementární náboj

l ... rozměry molekuly

Ve speciálním případě, kdy jsou si rovny velikosti potenciálových bariér W_1 a W_2 (iont a molekula) je možné prohlásit, že součin dynamické viskozity a konduktivity je konstantní a nezávislý na teplotě. Tato skutečnost platí pouze pro úzké spektrum teplot a pouze pro nepolární kapaliny s minimálním obsahem příměsí a nečistot [1, s.83 – s.86].

2.5 Dielektrické ztráty

Tato vlastnost izolačních materiálů je nejdůležitějším parametrem z hlediska použitelnosti daného materiálu v praxi. Definovat ji lze několika způsoby, ale vždy se jedná o určitou část elektrické energie, která se díky dějům uvnitř struktury materiálu a po zatížení elektrickým polem rozptyluje nebo častěji mění v nežádoucí tepelnou energii v objemu dielektrika za jednotku času. Nežádoucím efektem tohoto mechanismu je ohřívání dielektrika. Z tohoto důvodu je potřeba vzniklou tepelnou energii odvést. Pokud by se totiž teplo nahromadilo v určité oblasti, vedlo by to pouze k opětovnému nárůstu ztrát a také dalšímu zahřívání, v jehož důsledku vzniká tepelný průraz [1, s.94], [3, s.337], [4, s.8].

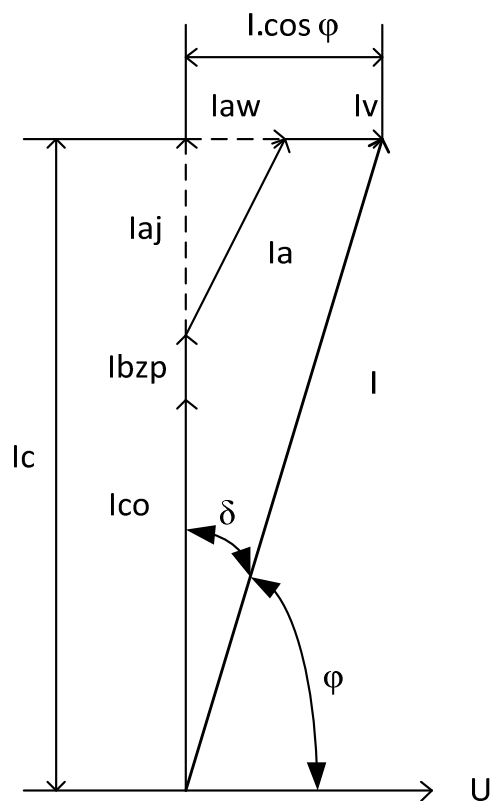
Dielektrické ztráty jsou závislé na mnoha faktorech. Za všechny zmiňme například strukturu materiálu a vlastnosti, dále také chemické složení, množství příměsí, čistotu materiálu, vnitřní stavbu, skupenství a v neposlední řadě frekvenci a teplotu. Uvedené parametry úzce souvisí s pohyblivostí volných nosičů náboje [1, s. 94- s. 95].

Dielektrické ztráty vznikají jak při stejnosměrném, tak při střídavém napětí.

V případě stejnosměrného elektrického pole se uplatňuje pouze vodivostní proud a ztrátový výkon (10) lze zapsat ve tvaru:

$$P_{Z_{ss}} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i} \quad (10)$$

Na rozdíl od předchozího vzorce, v případě střídavého elektrického pole se kromě vodivostního proudu projevují také ztráty vyvolané polarizacemi, proto je výsledná hodnota vždy větší než v případě ztrát způsobených stejnosměrným elektrickým polem. Při řešení tohoto problému se uplatňuje dříve definovaná veličina – ztrátový úhel δ . V tomto případě označuje úhel zpoždění časového průběhu elektrické indukce za časovým průběhem intenzity elektrického pole [1, s.96 – s.97], [4, s.7 – s.8]. Danou problematiku blíže objasní následující fázorový diagram (Obr. 2.9).



Obr. 2.9 - Fázorový diagram reálného dielektrika – převzato z [1, s.97], [4, s.7]

Z fázorového diagramu lze odvodit vzorec (11), (12), (13) a (14) pro dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli.

$$P_{Z_{stř}} = U \cdot (I_{aw} + I_V) \quad (11)$$

$$P_{Z_{stř}} = U \cdot I \cdot \sin \delta \quad (12)$$

$$P_{Z_{stř}} = U \cdot I_C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (13)$$

$$P_{Z_{stř}} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (14)$$

I_{aw} ... činná složka absorpčního proudu

I_V ... vodivostní proud

C ... kapacita dána součtem geometrické kapacity C_0 a kapacity C_p

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je bezrozměrná veličina a v praxi je užíván k hodnocení kvality daného dielektrika. Pro lepší představu, hranice mezi dobrým a špatným izolačním materiálem

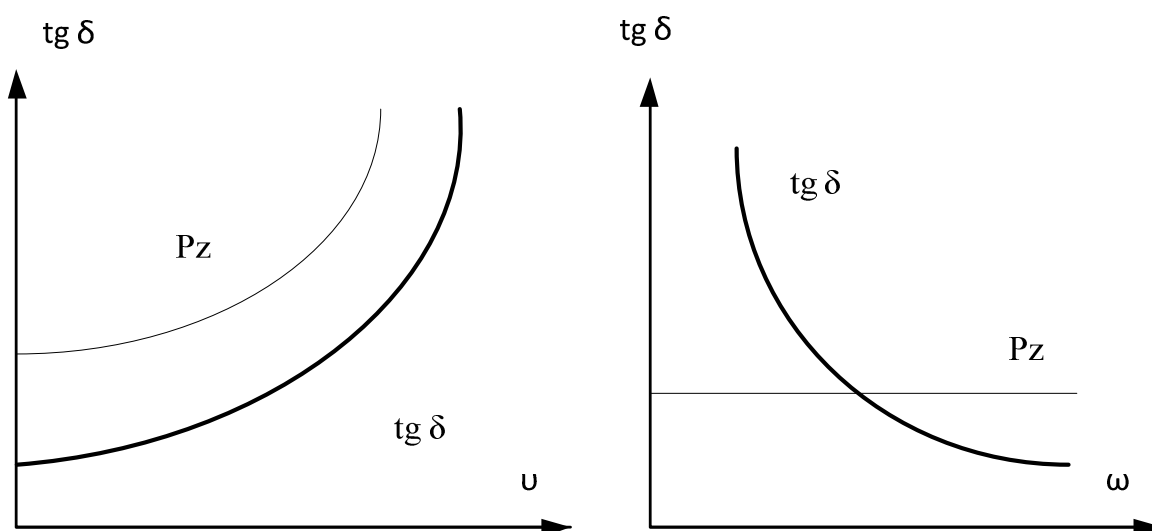
leží v rozmezí 10^{-3} až 10^{-2} (čím menší, tím lepší). Pro detailnější a objektivnější hodnocení kvality dielektrika se ale používají závislosti parametru $\text{tg } \delta$ na napětí, frekvenci a teplotě. [1, s.102], [3, s.337]

V následujícím odstavci je přiblížena problematika kapalin a jejich dielektrických ztrát, které jsou závislé na typu použité kapaliny. Zejména na tom, zda se jedná o dielektrikum polární či nepolární a samozřejmě také na čistotě a množství příměsí.

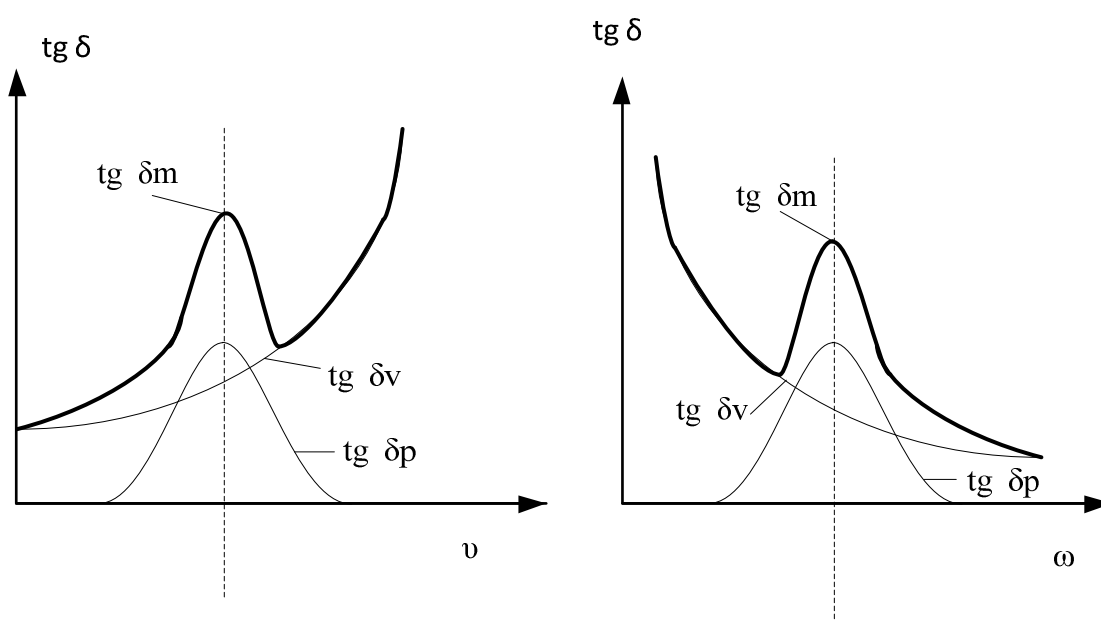
U nepolárních kapalných izolantů se vyskytuje pouze elektronová polarizace, která nepůsobí žádné další ztráty, jelikož není frekvenčně závislá. Z tohoto důvodu se uplatňuje pouze vodivostní složka, která nepůsobí tak velkou měrou, a proto dosahuje nižších hodnot.

Naopak u polárních kapalin vystupují na povrch ztráty způsobené polarizací, které tvoří významnou část celkových dielektrických ztrát [1, s.106]. V tomto případě jsou hodnoty ve srovnání s předchozím případem výrazně vyšší.

Na následujících grafech (Obr. 2.10) a (Obr. 2.11) lze pozorovat závislosti ztrátového činitele na frekvenci a napětí pro jednotlivé typy kapalin.



Obr. 2.10 - Teplotní a frekvenční závislost parametru $\text{tg } \delta$ nepolárních kapalin - převzato z [1, s. 107]



Obr. 2.11 - Teplotní a frekvenční závislost parametru $\text{tg } \delta$ polárních kapalin - převzato z [1, s.107]

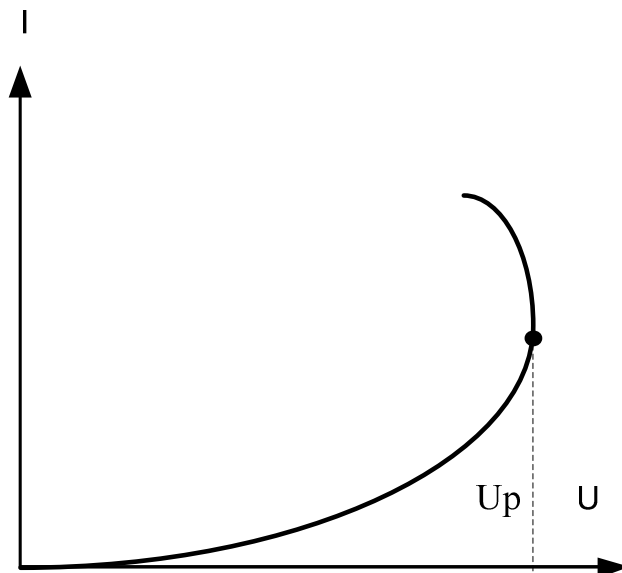
2.6 Elektrická pevnost

Jestliže jsou dielektrické ztráty označovány jako nejdůležitější parametr dielektrik z hlediska použitelnosti, tak parametr elektrické pevnosti má svoji důležitost při dimenzování dielektrického obvodu daného zařízení. Základním úkolem dielektrika je oddělit místa s různým elektrickým potenciálem a právě kritickým měřítkem je elektrická pevnost.

Definice této veličiny zní následovně. Jedná o podíl průrazného napětí U_p a tloušťky zkoumaného dielektrika d v místě průrazu. Výraznou roli při provádění zkoušky hrají okolní podmínky a velikost přiloženého napětí. Pokud napětí v daném místě překročí určitou mez, charakteristickou pro každé dielektrikum, dochází k nárůstu koncentrace volných nosičů, tím pádem se snižuje původní rezistivita materiálu a zároveň izolační schopnost. V důsledku těchto pochodů vzniká výboj (průraz), který vodivě propojí původně izolovaná místa v dielektrickém materiálu.

Tento finální efekt má dvě stadia, prvním stadiem je prudký nárůst konduktivity, druhé stadium je poté vlastní výboj a následná degradace použitého materiálu.

Obě stadia elektrického výboje lze sledovat na následujícím obrázku (Obr. 2.12) [1, s.111-s.112], [2, s.51], [3, s. 343], [4, s.28].



Obr. 2.12 - Průběh elektrického výboje v dielektriku - převzato z [3, s.343]

Jak již bylo zmíněno několikrát, tak i v tomto případě je průběh a výsledná hodnota tohoto parametru silně závislá na mnoha činitelích. Například na množství příměsí, v tomto případě hlavně vody a rozpuštěných plynů. Dále působí tvar a znečištění elektrod, rozložení elektrického pole v jejich blízkosti a použité napětí.

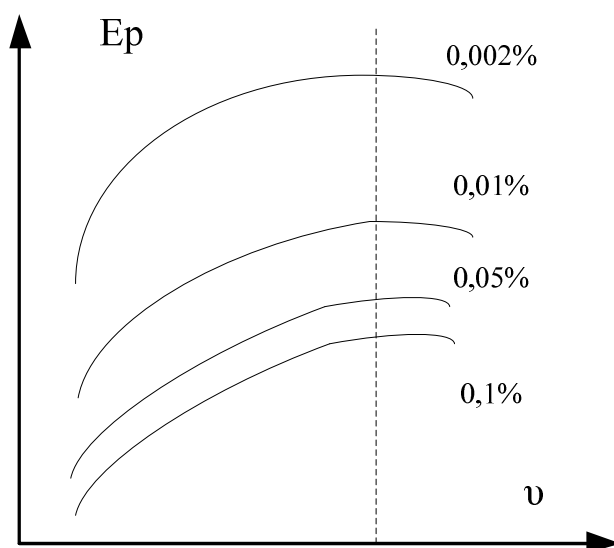
Tato oblast je dosud příliš neprověřená, proto jsou experimentální výsledky různých měření dosti odlišné a často i protichůdné [1, s.123], [3, s. 344-s.345], proto bych zde uvedl několik parametrů vyskytujících se u kapalných izolantů:

- elektrická pevnost vyšší než u plynů
- různé mechanismy přeskočů - tepelný nebo čistě elektrický
- začátek šíření výboje v místě nečistoty

Teorie průrazu u kapalných izolantů je velmi složitá záležitost. Dle autora [1] je možné rozdělit všechny hypotézy do dvou skupin, podle pohledu na daný problém. První skupina teorií se nazývá emisní, která vysvětluje mechanismus na emisi elektronu z elektrody a následnou nárazovou ionizací. Dále se tyto úvahy rozdělují na emisi studenou a Schottkyho emisi [1, s.124].

Druhá skupina teorií, založena na vzniku plynových bublinek v objemu kapaliny je nazvána teorií bublinkovou. V tomto případě je vznik přeskočků pevně vázán na čistotu kapaliny a teorie nepředpokládají další nehomogenity v kapalině.

Na dalším obrázku (Obr. 2.13) je možné pozorovat vliv přítomnosti vody v izolačním oleji.



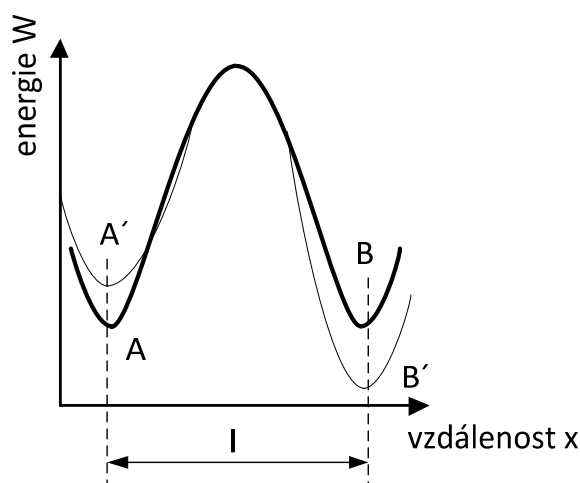
Obr. 2.13 - Teplotní závislost elektrické pevnosti minerálního oleje v závislosti na obsahu vody
- převzato z [1, s. 126]

Dalším faktorem, který způsobuje pokles elektrické pevnosti je materiál, ze kterého jsou vyrobeny elektrody systému. Tento fakt je prokázán u extrémně čistých kapalin, naopak u technicky čistých kapalin je rozhodujícím faktorem kvalita a čistota povrchu elektrod, nikoliv však samotný materiál.

V neposlední řadě je důležitým činitelem průběh napětí, jelikož při napájení systému impulzním napětím dosahuje elektrická pevnost vyšších hodnot než v případě dlouhodobě zvyšujícího se průběhu napětí, což je pravděpodobně způsobeno faktem, že při impulzním průběhu se v kapalině nečistoty nepohybují a nevytváří vodivé cesty [1, s.127].

3 Degradální jevy v elektroizolačních kapalinách

Následující kapitola se zabývá pojmem degradace, což je jev postupně znehodnocující vlastnosti daného materiálu [7, s.2]. Tento efekt lze dobře objasnit na modelu dvojité potenciálové jámy (Obr. 3.1). Při působení určitého degradačního činitele je do materiálu dodáno určité množství energie (tepelná, elektrická), které způsobí změnu ve struktuře materiálu. Tím je myšlen přechod přes energetickou bariéru z bodu A do bodu B [27, s.64]. Neustálým působením tohoto degradačního vlivu se tvar dvojité jámy deformuje a přechod z bodu A do bodu B se stává snadnějším a naopak návrat z bodu B do bodu A je téměř nemožný.



Obr. 3.1 - Model dvojité potenciálové jámy - převzato z [27, s.64]

Výše uvedený princip způsobuje změnu vlastností fyzikálních, chemických i elektrických. Míra těchto změn je silně závislá na struktuře zkoumané látky, dále pak na délce vystavení degradačním činitelům. Působící činitele lze dělit dle několika hledisek [8, s.1]:

- vliv podnebí - zejména klimatické jevy jako teplota, vlhkost a mikroorganismy
- vliv průmyslového prostředí - průmyslové znečištění
- vliv provozní - zejména vliv elektrického pole, dále pak mechanické namáhání, radiace atd.

V dalším textu bude pozornost věnována pouze některým vlivům, které je možné sledovat u kapalných izolantů.

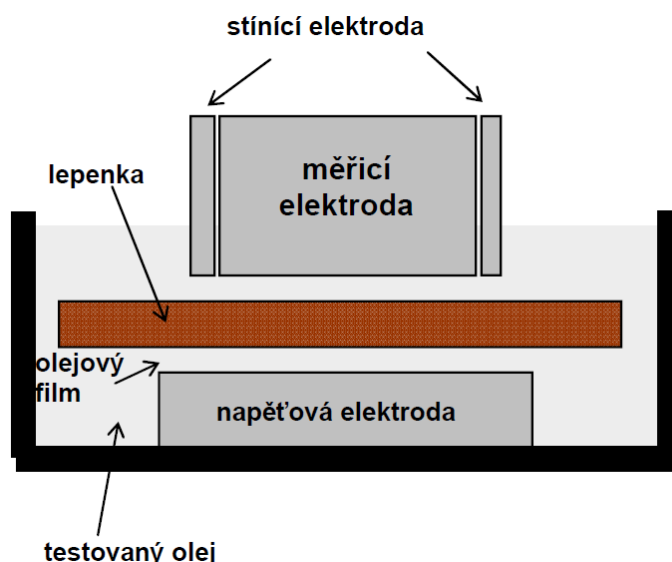
3.1 Teplota

Jedním z nejdůležitějších činitelů je teplota. Degradace prostřednictvím tohoto jevu se také často nazývá tepelné stárnutí. Při běžném provozování izolačního oleje v prostředí

transformátoru se teploty pohybují v rozsahu $60 \div 90$ °C. Při těchto teplotách běžně dochází k neodvratnému jevu přirozeného stárnutí. Pokud ale teploty překročí tuto hodnotu, tak prudce vzrůstá míra degradace. Při zvýšení teploty dochází k dalším doprovodným jevům. Zejména se jedná o vznik rozkladových plynů, které jsou v kapalině částečně rozpustné [10, s.26], [11, s.35]. Tento fakt a obecně teplota jako degradační mechanismus ovlivňuje velké množství vlastností izolačního oleje. Jedná se zejména o rezistivitu, ztrátový činitel, viskozitu a další neelektrické vlastnosti.

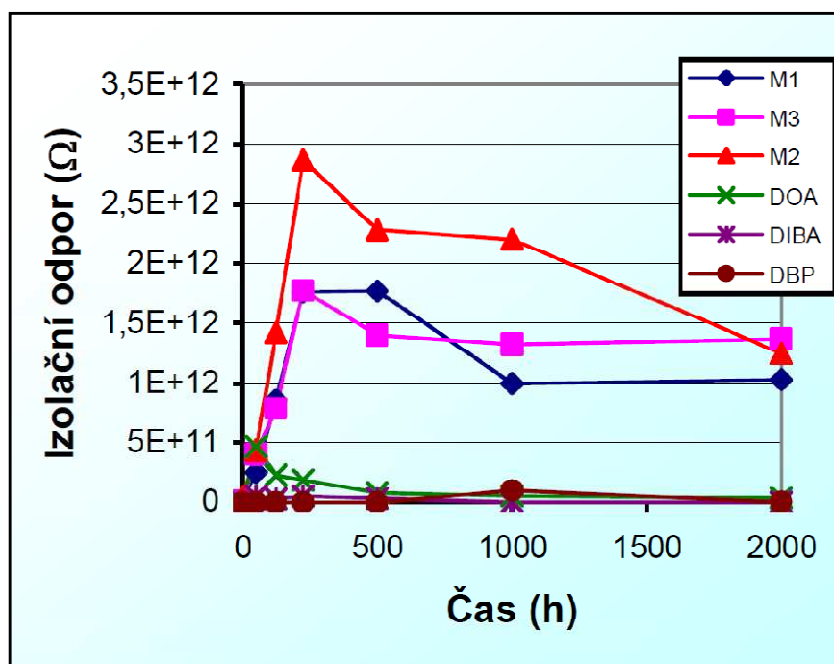
Pro rychlost stárnutí není důležité množství dodaného tepla, ale konkrétní hodnota teploty. Vysvětlení je takové, že vlivem zvýšené teploty dochází ke štěpení méně stabilních vazeb uvnitř struktury látky a uvolňují se radikální částice, které se mohou přesunovat a tvořit nové molekuly. Touto řetězovou reakcí a zvyšující se teplotou se tvoří neustále další radikály a nové větší molekuly [10, s.26], [11, s.35], [12, s.34].

V dnešní době je nejpoužívanější systém olej - papír, proto také často dochází ke studiu chování různých izolačních olejů. V tomto bodě zmiňme jeden z mnoha experimentů [9], kdy jsou zkušební vzorky celého systému olej- papír vystaveny teplotě 90 °C a v určitých časových intervalech jsou zaznamenávány charakteristické veličiny (ztrátový činitel, permitivita, izolační odpor). Na následujícím obrázku (Obr. 3.2) lze pozorovat uspořádání měřicího systému.

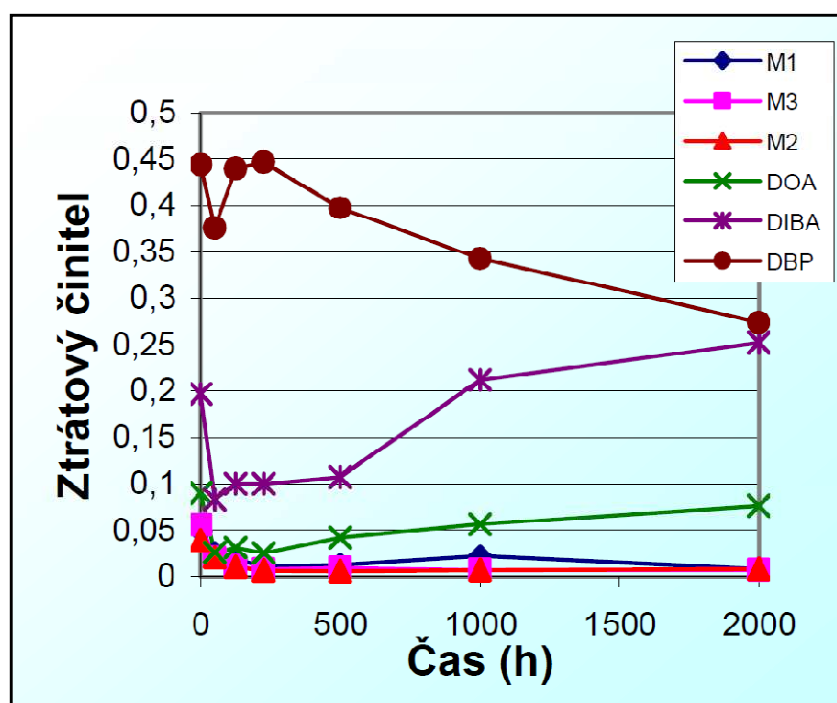


Obr. 3.2 - Měřicí systém pro měření teplotního stárnutí systému olej - papír - převzato z [9, s.3]

Další obrázky (Obr. 3.3) a (Obr. 3.4) znázorňují grafické závislosti vybraných parametrů na době stárnutí.



Obr. 3.3 - Závislost izolačního odporu v čase - převzato z [9, s.3]



Obr. 3.4 - Závislost ztrátového činitele v čase - převzato z [9, s.3]

3.2 Elektrické pole

Tento faktor je dalším velmi důležitým činitelem v rámci degradačních jevů probíhajících v elektroizolačních kapalinách. Olej je během svého provozu vystaven působení elektrického pole, v jehož důsledku dochází k lokálnímu namáhání dielektrika. Tento jev úzce souvisí s množstvím vody, obsaženém v oleji. V důsledku toho vznikají ve struktuře částečné výboje o malých hodnotách, jejichž původcem, jak již bylo řečeno dříve, jsou nehomogenity ve struktuře materiálu a tedy i částice vody. V důsledku částečných výbojů dále vznikají ve struktuře izolantu dutinky vyplněné plynem, jejichž množství je závislé na velikosti působícího elektrického pole. Pokud množství těchto plynových dutinek přesáhne určitou mez, tak kapalina již není schopna plyn absorbovat a plynové kapsle v oleji zůstávají a dochází v nich k ionizaci a následným výbojům [10, s.30], [11, s.39 - s.40].

Dutinka s plynem má hodnotu permitivity kolem 1, naopak permitivita okolní izolační kapaliny je několikrát větší (2-7), proto jsou tyto plynové kapsle také několikanásobně namáhány elektrickým polem. Výsledkem tohoto jevu jsou částečné výboje, jejichž průvodním jevem je tvorba dalších produktů, zejména ozónu a oxidu dusíku, které dále agresivně působí v dané struktuře materiálu [10, s.30], [11, s.40].

Modely popisující degradaci elektroizolačního materiálu

Problematika stárnutí teplotou a elektrickým polem je úzce spjata a pro popis jsou používány různé matematické a fyzikální modely [28, s.1].

Matematický model je jednodušší variantou než model fyzikální a je získán z empiricky zjištěných závislostí [27, s.63]. Používají se pro popis degradace při uvažování pouze jednoho působícího elementu – například elektrické pole. Použité modely mohou mít více podob vyjádření, například mocninné (15) nebo exponenciální (16) [27, s.63].

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (15)$$

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad (16)$$

τ ... životnost izolace

k, a, b, n ... experimentálně určené konstanty

E ... intenzita elektrického pole

Dále lze za matematický model považovat **Arrheniův model (17)** pro popis teplotní degradace materiálu [28, s.2]:

$$\tau(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (17)$$

A, B ... experimentálně určené konstanty

T ... termodynamická teplota

Naproti tomu fyzikální model vždy uvažuje více než jeden působící faktor. Vychází z teoretických předpokladů působení degradačních faktorů na daný materiál [27, s.63].

Prvním příkladem je **Simoniho model (18)** [27, s.63], [28, s.2]:

$$\tau = A \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot e^{\left(a + \frac{B}{T}\right)} \cdot f(E) \quad (18)$$

f(E) ... obecná funkce vlivu elektrického pole

T ... termodynamická teplota

A, a, B ... materiálové konstanty

Dalším modelem je **Ramuův model (19)**, který znázorňuje degradaci elektrickým polem s tepelnou závislostí [27, s.63], [28, s.3]:

$$\tau(T, E) = c(T) E^{-n(T)} \cdot e^{-B\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (19)$$

dále platí

$$c(T) = e^{c_1 - c_2\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (20)$$

$$n(T) = n_1 - n_2\Delta\left(\frac{1}{T}\right) \quad (21)$$

c_1, c_2, n_1, n_2 ... konstanty

a platí

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \quad (22)$$

Mezi další fyzikální modely lze zařadit **Fallounův model**, který je označován jako poloempirický a vychází z matematického modelu v exponenciálním tvaru (23) [27, s.64], [28, s.3].

$$\tau = e^{A(E) + \frac{B(E)}{T}} \quad (23)$$

kde platí

$$E > 0$$

$$A(E) = A_1 + A_2 \cdot E \quad (24)$$

$$B(E) = B_1 + B_2 \cdot E \quad (25)$$

$A_1, A_2, B_1, B_2 \dots$ experimentálně zjištěné konstanty

Posledním modelem je plně fyzikální **model podle Crinea**. Všechny konstanty vystupující ve vzorci (26) mají svůj fyzikální význam. Princip je založen na potenciálové jámě, již zmíněné v úvodu této kapitoly [27, s.64], [28, s.4].

$$\tau = \left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta W}{k_B T}} \cos h \left(\frac{e_p l E}{k_B T} \right) \quad (26)$$

$h \dots$ Planckova konstanta

$k_B \dots$ Boltzmanova konstanta

$\Delta W \dots$ volná aktivační energie

$l \dots$ vzdálenost mezi oběma stavy

$e_p \dots$ elektrický náboj částic ovlivňující stárnutí

$T \dots$ termodynamická teplota

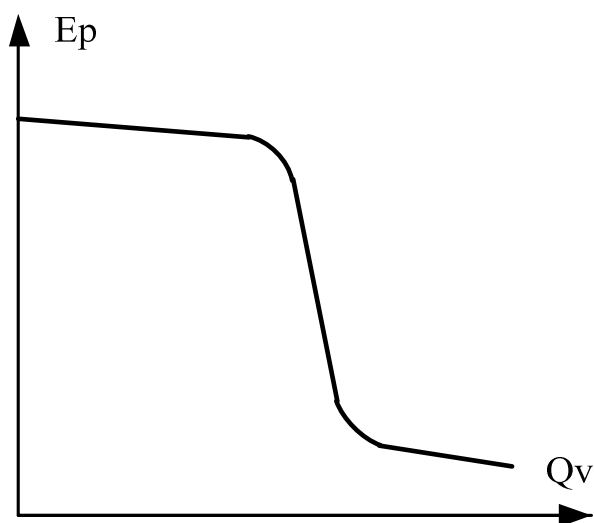
3.3 Klimatické podmínky

- **vlhkost**

Dalším degradačním činitelem, který způsobuje výrazné zhoršení elektrických vlastností je vlhkost, respektive částice vody obsažené v izolační kapalině. Hlavním původcem této vlhkosti je atmosférická vlhkost. Zdrojem vlhkosti je papírová složka izolačního systému olej-papír, která degraduje a tím uvolňuje do oleje určité molekuly vody. Druhý možný způsob je vznik vody jako produktu při degradaci oxidací. Jelikož množství vody v izolačním oleji je velmi důležitým parametrem a olej není schopen všechnu vodu absorbovat, protože hodnota nasycení je velmi nízká, vyskytuje se voda v oleji v několika formách:

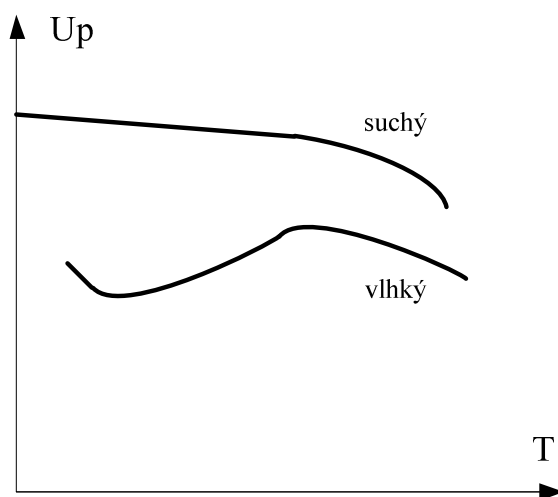
- volná voda - většinou je na dně transformátorové nádoby, vlivem hygroskopicity izolačního oleje z ovzduší, množství je proměnné jelikož v závislosti na vlastnostech daného oleje se může měnit na vodu rozpuštěnou nebo emulgovanou
- rozpuštěná - olej obsahuje vždy určité množství tohoto druhu vody díky schopnostem absorpce
- emulgovaná - je tvořena směsí mikroskopických kapek vody volně se pohybujících v oleji, její odstranění je velmi obtížné a v důsledku této formy vody jsou zhoršeny dielektrické vlastnosti
- reakční - vzniká v nejteplejším místě transformátorové nádoby vlivem chemických reakcí probíhajících ve struktuře látky, při styku s chladnější vrstvou kapaliny se mění ve vodu rozpuštěnou

Již dříve bylo řečeno, že největší podíl na dielektrických ztrátách (snížení elektrické pevnosti) má voda ve formě emulze, jejíž drobné částice jsou přitahovány do oblasti s největší elektrickou intenzitou, kde následně utváří řetězce, které jsou vlastně vodivou cestou a mohou způsobovat přeskok. Proto by u každého oleje měla být uvedena hodnota nasycení, tedy maximální možné množství vody, které je olej schopen rozpustit. Při přesycení oleje se přebytek vody vyskytuje ve formě emulze, která parametr elektrické pevnosti ovlivňuje nejvíce, jak je vidět z následujícího obrázku (*Obr. 3.5*) [2, s.301-s.302], [10, s.28].



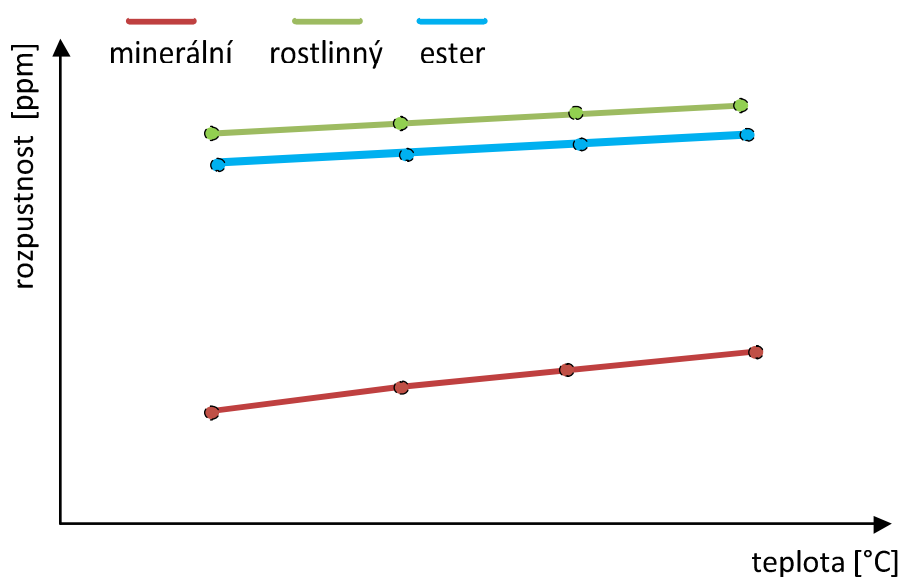
Obr. 3.5 - Závislost elektrické pevnosti na obsahu vody v oleji - převzato z [2, s.302]

Parametr udávající hodnotu nasycení je závislý na teplotě. S rostoucí teplotou roste schopnost oleje vodu absorbovat, proto je vhodné parametr vztahovat k určité teplotě. Tuto skutečnost znázorňuje následující obrázek (Obr. 3.6), kde jsou znázorněny rozdílné vlastnosti suchého a vlhkého oleje pomocí průrazného napětí.



Obr. 3.6 - Závislost průrazného napětí suchého a vlhkého oleje na teplotě - převzato z [2, s.303]

Samozřejmě schopnost absorpce se značně liší dle typu použitého oleje. Skutečnost znázorňuje další obrázek (Obr. 3.7).

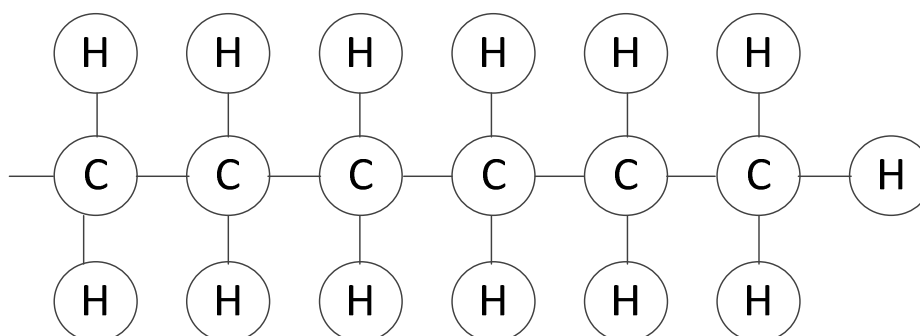


Obr. 3.7 - Rozpustnost vody v oleji v závislosti na teplotě a druhu oleje – zdroj KET

- **záření**

Izolační materiál vystavený slunečnímu záření, absorbuje určitou část tohoto záření, což má za následek fotochemické a fotooxidační pochody ve struktuře látky [8, s.2].

Tento efekt je silně závislý na přesném chemickém složení daného oleje, jelikož z mechanismu fotodegradace vyplývá, že různé chemické vazby absorbují různé vlnové délky. Pro příklad je zobrazena obecná chemická struktura minerálního oleje (Obr. 3.8).



Obr. 3.8 - Obecné chemické složení minerálního oleje

Minerální olej je směs různých uhlovodíkových molekul, na které působí různé vlnové délky, a které provází různá působící energie (Tabulka 1).

Tabulka 1 - Energie vyvolaná působením slunečního záření [13, s.19]

| Vazba | Vlnová délka | Energie |
|-------|---------------------------|---------------------------------------|
| C - C | 0,23 - 0,25 μm | 540 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ |
| C = C | 0,23 - 0,25 μm | 837,3 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ |
| C - H | 0,23 - 0,29 μm | 506,6 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ |

K rozštěpení molekul je potřebná tzv. disociační energie, která je u jednoduchých vazeb následující [13, s. 19] :

- vazba C - H 413 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- vazba C - C 347 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- vazba C = C 610 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

Z předchozích hodnot je jasně patrné, že fotodegradace je doprovázena dostatečným množstvím energie, které způsobuje štěpení vazeb mezi uhlíkem a vodíkem. V důsledku toho vznikají nové produkty - značně nestabilní, které se dále vážou a vytváří molekuly plynů, například vodík nebo metan. Tento efekt byl již popsán v (odstavci 3.2), kdy jsou plyny v oleji namáhány elektrickým polem [10, s.46], [13, s.14 - s.22].

4 Biodegradabilita transformátorových olejů

Biodegradabilita, jinými slovy také biologická rozložitelnost látky, je schopnost látky podléhat vnějším vlivům, zejména působení mikroorganismů. Jedná se o schopnost rozložit daný materiál na složky nezatěžující životní prostředí. S pojmem biologické rozložitelnosti souvisí další pojmy, jako aerobní a anaerobní rozklad.

Rozdílnost těchto pojmů je v tom, že aerobní rozklad probíhá při styku rozkladových mikroorganismů se vzduchem, naopak anaerobní rozklad, respektive působící částice nevyžadují kyslík ze vzduchu a produktem tohoto procesu jsou bioplyny.

Tato vlastnost látek začíná v dnešní době nabývat velké důležitosti a to zejména ze dvou důvodů:

1. V dnešní době stále nejvíce rozšířené minerální oleje vyrobené destilací ropy, jejichž výroba, transport a možnost úniku do životního prostředí [11, s.32], [15, s. 6], je spjata s možností velké ekologické katastrofy, jelikož jejich biologická odbouratelnost je velmi špatná.
2. Druhým důvodem pro zamyšlení se nad zavedením biologicky odbouratelných látek je skutečnost, že tato vlastnost se často pojí s kapalinami na bázi rostlinných olejů, ať až v čisté formě nebo jako základní složka esterů. Tyto produkty jsou na rozdíl od ropy dobře dostupné.

Hlavně kvůli těmto nedostatkům a skutečnostem se v posledních letech příchodem biodegradabilních izolačních kapalin zabývá mnoho článků a studií [14], [15], [17], kde se autoři zabývají zejména porovnáním elektrických parametrů izolačních olejů na bázi minerálních olejů a rostlinných olejů či esterů ať už syntetických nebo organických.

Na tomto místě je vhodné uvést některé výhody a nevýhody používaných biologicky odbouratelných izolačních kapalin. Obecně lze říci, že jejich nespornou výhodou, kromě již zmíněné biodegradability, je jejich vyšší hodnota teploty vzplanutí. Dále je to vyšší hodnota hygroskopicity, některé články [15] uvádějí hodnoty až 1200 ppm. Mezi hlavní nevýhody, oproti minerálním olejům, patří zejména horší elektrické parametry, chladicí vlastnosti a v neposlední řadě cena [14, s.2], [15, s.3 - s.4].

4.1 Metody testování

V praxi se používá mnoho norem pro měření biodegradability látek, ale asi nejrozšířenějšími a nejpoužívanějšími postupy jsou testy **CEC-L-33-A-93** Evropské organizace CEC (Coordinating European Council) a test **OECD 301 A÷F** organizace OECD (The Organisation for Economic Co-operation and Development). Tyto dva testovací postupy biologické rozložitelnosti respektují jak České Technické Normy [18], tak vládní rozhodnutí [16], která stanovují požadavky na látky, které se chtějí ucházet o ochrannou známku - EKOLOGICKY ŠETRNÝ VÝROBEK. Tyto postupy respektují také zahraniční autoři, jež je uvádějí ve svých člancích [15].

Principem metody CEC-L-33-A-93 je porovnání testovaného vzorku se vzorkem referenčním. Testovaný vzorek je naočkován bakteriální kulturou, naopak referenční vzorek je kontaminován HgCl_2 . V průběhu 21 dnů se měří pokles hodnoty sledovaných látek - uhlovodíků pomocí IR spektroskopie. Po uplynutí této doby se porovnávají hodnoty těchto parametrů u obou vzorků a výsledná procentuální hodnota biologické rozložitelnosti (27) je dána vztahem:

$$PB = 100 \cdot \frac{P - T}{P} [\%] \quad (27)$$

PB ... procentuální biologická rozložitelnost

P ... zbytkový obsah na referenčním vzorku

T ... zbytkový obsah na testovacím vzorku

Druhá metoda dle normy OECD 301 se skládá z několika částí a každá z nich je specifikována pro sledování různého druhu rozpadových látek.

4.2 Postup zkoušení a praktická zkouška

V tomto odstavci bude blíže specifikována metoda OECD 301, kterou jak již bylo dříve zmíněno, respektuje Česká Technická norma [18]. Tato norma obsahuje šest různých metod pro měření biodegradability (*Tabulka 2*):

Tabulka 2 - Metody měření biodegradability dle OECD 301 [16, s.4], [19, s.1]

| Metoda | Originální název | Český název |
|--------|---|--|
| 301 A | DOC Die-Away | Zkouška úbytku rozpuštěného organického uhlíku - DOC |
| 301 B | CO ₂ Evolution - Sturm test | Zkouška vývinu CO ₂ (modifikovaná Sturmova zkouška) |
| 301 C | MITI (Ministry of International Trade and Industry) | Zkouška MITI |
| 301 D | Closed Bottle | Zkouška v uzavřených nádobách |
| 301 E | Modified OECD Screening | Modifikovaná vyhledávací zkouška OECD (úbytek DOC) |
| 301 F | Manometric Respirometry | Manometrická respirometrická zkouška |

Testování vzorků v rámci této práce probíhalo dle metody 301 D. Principem metody je vytvoření roztoku zkoušené látky a minerálního média v malém množství, většinou 2 – 5 mg/l. Tento roztok se poté naočkuje malým množstvím bakterií z různých populací. Vše je následně uchováno v uzavřené nádobě, při konstantní teplotě a na temném místě, aby byly vyloučeny ostatní degradační mechanismy. Proces sledování dané látky trvá 28 dní a probíhá prostřednictvím analýzy rozpuštěného kyslíku. Množství kyslíku využitě mikroorganismy k biologickému rozkladu zkoušené látky probíhá současně s dějem v tzv. čisté inokule, kde jsou očkované stejné populace bakterií. Tento proces slouží jako reference. Korekce výsledků probíhá pomocí procentuálního vyjádření teoretické spotřeby kyslíku [19, s.32 - s.36].

Výsledné hodnoty degradace (28) a (29) vycházejí z těchto vzorců:

$$\begin{aligned}
 BOD &= \frac{mg\ O_2/l(\text{testovaný vzorek}) - O_2/l(\text{čistá inokula})}{mg/l \left(\frac{\text{testovaný vzorek}}{\text{velikost nádoby}} \right)} = \\
 &= mg\ O_2 / mg\ \text{testovaného vzorku}
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

$$PB = \frac{BOD \left(\frac{mg O_2}{mg \text{ testovaného vzorku}} \right)}{ThOD \left(\frac{mg O_2}{mg \text{ testovaného vzorku}} \right)} \cdot 100 [\%] \quad (29)$$

BOD ... biochemická spotřeba kyslíku

PB ... procentuální biologická rozložitelnost

ThOD ... teoretická spotřeba kyslíku

Výsledky testů biologické odbouratelnosti několika vzorků izolačních kapalin byly získány v rámci řešení projektu TAČR 03020251 – Izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí, který probíhá na KET/ FEL ZČU v Plzni. Praktickou zkoušku v rámci výše zmíněného projektu zajistila ekologická laboratoř EMPLA AG spol. s r.o. Měření probíhalo dle normy OECD 301 D - zkouška v uzavřených nádobách.

Měření bylo provedeno na pěti různých vzorcích:

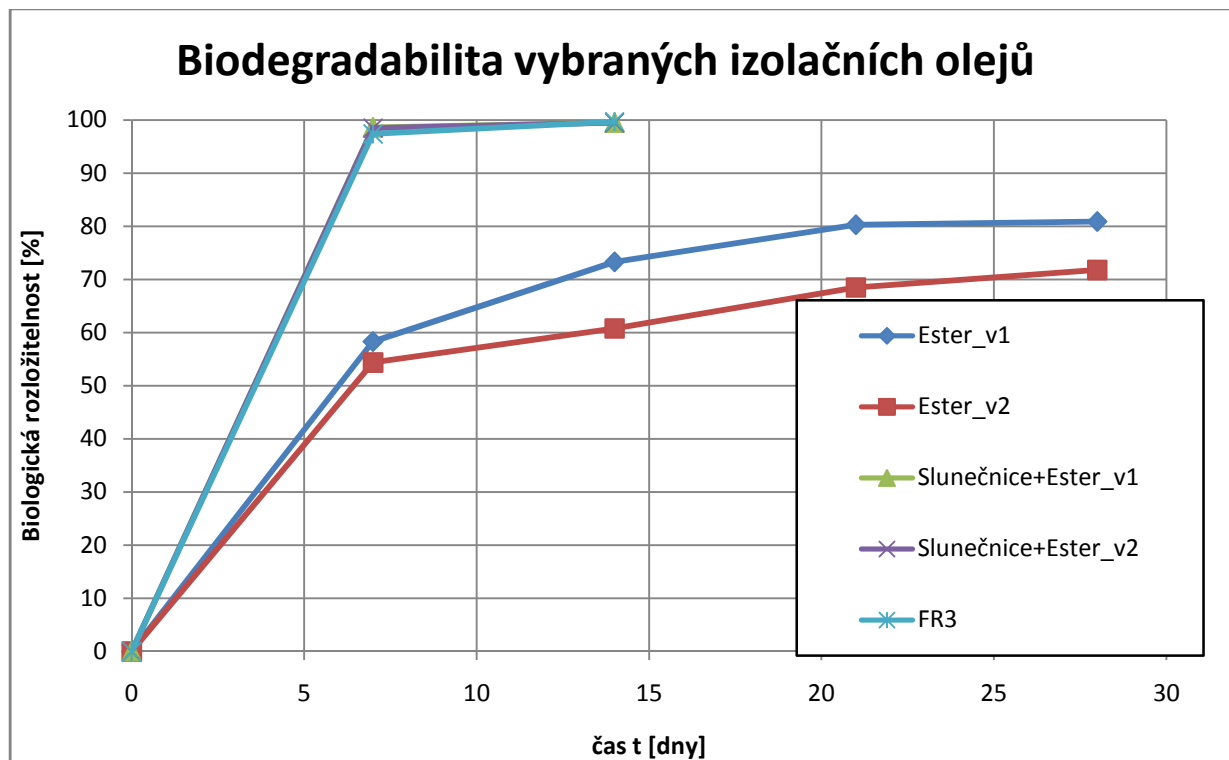
- testovací syntetický ester vzorky: Ester_v1 a Ester_v2
- rostlinný olej + synt. ester vzorky: Slunečnice+Ester_v1 a Slunečnice+Ester_v2
- komerční ester vzorky: FR3 Envirotemp výrobce COOPER

Měření probíhá 28 dní a hodnoty jsou shromažďovány každých 7 dní. Naměřené hodnoty jsou průměrem ze dvou měření (*Tabulka 3*).

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty biologické rozložitelnosti testovaných vzorků

| | | počet dnů procento rozložení | | | | |
|----|---------------------|--------------------------------|------|------|------|------|
| ID | název | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 |
| 1 | Ester_v1 | 0 | 58,3 | 73,3 | 80,3 | 80,9 |
| 2 | Ester_v2 | 0 | 54,4 | 60,8 | 68,5 | 71,8 |
| 3 | Slunečnice+Ester_v1 | 0 | 98,6 | 99,5 | | |
| 4 | Slunečnice+Ester_v2 | 0 | 98,5 | 99,5 | | |
| 5 | FR3 | 0 | 97,4 | 99,7 | | |

Výsledné průběhy jsou přehledně zobrazeny v následujícím grafu (Obr. 4.1) a minimální požadovaná hodnota biologické rozložitelnosti činí 70 %.



Obr. 4.1 - Biologická rozložitelnost různých druhů izolačních kapalin – zdroj KET, TAČR 03020251

Zhodnocení naměřených dat

V rámci testování a vývoje nových biodegradabilních izolačních kapalin byla data měřena na 2 vzorcích syntetických esterů. Biodegradabilita těchto dvou vzorků vykazovala nejnižší úroveň odbouratelnosti ze všech testovaných vzorků, nicméně i Ester_v2, jehož hodnota rozložitelnosti po 28 dnech činila 71,8 %, splňoval minimální požadavky dané technickou směrnicí [16], jejíž minimální hodnotou je 70 % po 28 dnech.

Dále byly testovány 2 vzorky syntetického esteru smíchaného se slunečnicovým olejem (rozdílné poměry obou složek). Zde již docházelo k plné biologické rozložitelnosti po 14 dnech působení bakterií. Shodné hodnoty 99,5 % jsou plně konkurenceschopné ve srovnání s komerčním produktem společnosti COOPER - FR3 Envirotemp, který byl do měření také zahrnut, a výsledné hodnoty zcela naplnily předpoklady, jelikož biologická odbouratelnost činila 99,7 % taktéž po 14 dnech vystavení bakteriálnímu prostředí. Základním prvkem toho izolačního oleje je rostlinný olej ze sojových bobů a dle [20] činí obsah tohoto oleje v tomto produktu 98,5 %.

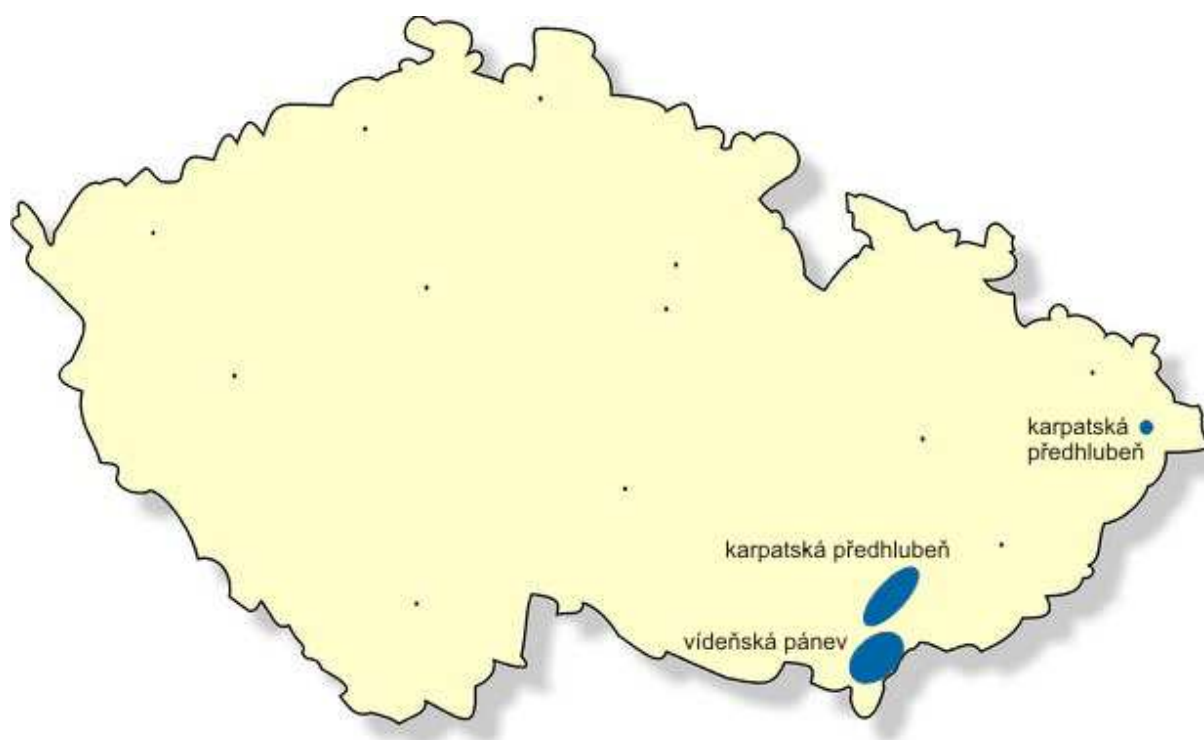
5 Způsob získávání izolačních kapalin s ohledem na poměry v ČR

Tato oblast je v České republice velmi problematická, jelikož převažující část používaných izolačních kapalin tvoří minerální oleje získávané rafinací ropy a její hlavní ložiska neleží na území našeho státu.

Dále je potřeba na tuto problematiku nahlížet alespoň ze dvou hledisek, kdy prvním hlediskem je schopnost území vyprodukovat základní složku daného materiálu. Tento fakt by mohl být nazýván hlediskem geografickým. Druhým možným pohledem je schopnost či možnost zpracovat základní surovinu ve finální produkt. V tomto okamžiku přichází ke slovu mnoho faktorů: know-how, velikost trhu, konkurence atp.

5.1 Minerální oleje

V tomto bodě se tedy zaměříme na minerální oleje, respektive základní surovinu, kterou je ropa. V ČR se ročně vytěží asi 300 - 400 tis m³ surové ropy, což pokrývá zhruba 2 - 3 % roční spotřeby. Tyto ložiska (*Obr. 5.1*) leží na jižní Moravě a spravuje je tuzemská společnost MND.



Obr. 5.1 - Ložiska ropy v České republice - převzato z [21]

Druhou část ropných zásob tvoří doprava ropovody Družba a IKL (Obr. 5.2). Následně je surová ropa zpracovávána v rafinérských závodech v Litvínově a Kralupech nad Vltavou, jež jsou vlastněny společností Česká rafinérská a rafinérií v Pardubicích společnosti PARAMO.



Obr. 5.2- Ropovody IKL a Družba - převzato z [29]

Pokud bychom tedy uvažovali problematiku z tohoto hlediska, pak surové ropy máme dostatečné množství pro výrobu minerálních izolačních olejů.

Nahlížíme-li na tuto problematiku z pozice, kdy se zabýváme finálním produktem, minerálním izolačním olejem pro použití v transformátorech, je situace složitější, jelikož prosadit se na trhu zavedených nadnárodních společností zabývajících se olejářským průmyslem nebo specializovaných firem je velmi složité. Proto se na českém trhu objevují zejména produkty renomovaných světových výrobců – Technol a Nynas (řady Nytro: Lyra, Libra, Taurus atd.) [41], ESSO (Transformer Oil P60) [42], Shell (Diala S2 ÷ S4) [30], Aral (Isolan T a Isolan TT) [43].

Pokud se zaměříme na výrobky výhradně českých výrobců, tak za zmínku stojí zejména společnost MOGUL (řada TRAF0 CZ, TRAF0 D a Paramo TRAF0 N-A) [36], která spadá do portfolia společnosti Paramo. Dalším, již podstatně menším výrobcem je společnost AT OIL, která na českém trhu prodává produkt pod názvem VoltWay N7X.

5.2 Rostlinné oleje

V případě používání rostlinných olejů je situace odlišná než v předchozím případě, jelikož zde leží velký potenciál, protože jak je patrné, tak základem těchto olejů jsou suroviny, které jsou na našem území dobře dostupné. Zejména se jedná o olej slunečnicový a řepkový, dále jsou samozřejmě testovány produkty postavené na dalších surovinách, které již nejsou tak dobře dostupné v České republice, ale jejich distribuce na našem území je již zavedená. Jedná se o olej získávaný ze sojových bobů, olivový olej nebo olej palmový.

Problémem tedy zůstává aplikace těchto olejů nebo jejich vhodné zpracování nebo mísení s různými aditivami za účelem dosažení požadovaných elektrických parametrů, srovnatelných s oleji minerálními.

Specializovaných společností na výrobu technických rostlinných olejů, jakými jsou například zahraniční společnosti COOPER vyrábějící velmi kvalitní rostlinný produkt na bázi sojových bobů Envirotemp FR3 [35] nebo společnost ABB a její produkt BIOTEMP [34] je v ČR velmi málo. Za všechny stojí za zmínku firma PREOL, která vyrábí produkty z řepkového semene a produkuje výrobek pod názvem MEŘO [33], tedy metylester mastných kyselin řepkového oleje. Tento produkt taktéž vyrábí společnost SETUZA [36].

Dále zmiňme obecný proces výroby izolační kapaliny na základě rostlinného oleje. Prvním krokem je vždy esterifikace, jinými slovy filtrace po prvotním vylisování, jejímž produktem je metylester nebo etylester. Druhý krok zahrnuje adsorpční rafinaci [10, s.13], která odstraňuje polární látky, upravuje barvu a kapalinu neutralizuje. V dalším kroku se odstraňují nežádoucí těkavé látky a zápach pomocí destilace. Posledním krokem tohoto procesu je mísení s antioxidantními činidly.

Závěrem tohoto odstavce je potřeba zmínit, že přechod na alternativní izolační kapaliny je nezbytný, což pochopila společnost Siemens [22], která přešla od laboratorního testování k testování reálného produktu. V současné době testuje komerční transformátory, v nichž chladicí a izolační médium tvoří rostlinné oleje.

5.3 Syntetické elektroizolační kapaliny

V tomto případě je situace nejsložitější, tyto kapaliny vznikly zejména z důvodu potřeby nahrazení minerálních olejů jako v předchozím případě. Jejich masivnímu rozšíření ale bránily

důvody zejména ekologického směru. Jelikož mnoho dříve vyráběných produktů obsahuje Polychlorované bifenyly (PCB) nebo Polychlorované terfenyly (PCT), které jsou toxické, proto dříve vyráběné produkty na našem území jsou již nyní zakázány. Jednalo se zejména o produkt pod obchodním názvem Delor, který byl používán jako transformátorová náplň systému olej-papír [18, s.7], [23, s.18]. Obsah těchto látek a měření upravuje mezinárodní norma IEC 61619.

Také v případě syntetických kapalin je potřeba alespoň ve zkratce zmínit dělení na jednotlivé typy a proces výroby.

- **Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků** – vznikají polymerací nenasyceného uhlovodíku (butylen nebo propylen), nejčastěji se používají jako impregnace svitkových kondenzátorů a jako plnivo v kabelech
- **Chlorované uhlovodíky** – vznik chlorováním benzenu nebo bifenyly, ekologicky závadné – zakázané
- **Silikonové kapaliny** – hlavní složkou tohoto produktu je metyl ($-CH_3$), etyl ($-C_2H_5$) nebo fenyl ($-C_6H_5$) [10, s.18]
- **Fluorované kapaliny** – označují se jako fluorokarbonáty, použití jako plnivo transformátorů
- **Organické estery** – proces výroby je založen na chemické syntéze základního materiálu na bázi rostlinného oleje a směsi ropných uhlovodíků s následným odstraněním center nestabilit [12, s.15]

V dnešní době stojí za zmínku snad již jen produkt společnosti Lučební závody Kolín a jejich produktová řada LUKOSOIL (Lukosoil M15 a Lukosoil M50 – 500) [31]. Tento druh kapaliny patří mezi silikonové směsi.

Další firmy se na našem trhu nevyskytují, proto většinu syntetických kapalin, které nalezneme v transformátorech, tvoří kapaliny zahraničních výrobců. Jedná se zejména o produkty MIDEL 7131 (firma M&I Materials) [32], SHELL FLUID 4600 (firma Shell) [30] a Envirotemp[®] 200 (firma Cargill) [35].

Největšími přednostmi těchto druhů kapalin jsou nesporně vyšší teplota vzplanutí a vyšší hygroskopicitu než u minerálního oleje. Na druhou stranu mají nepatrně vyšší hodnotu viskozity [18, s.7], která způsobuje větší zahřívání celého systému.

6 Elektrické zkoušky izolačních kapalin

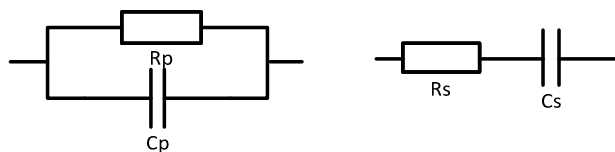
Nyní se dostáváme k poslední části této práce, kterou tvoří část experimentální. U několika vzorků izolačních olejů probíhala měření elektrických parametrů s cílem porovnat parametry jednotlivých izolačních kapalin. Zejména se jednalo o parametry ztrátového činitele, permitivity a v neposlední řadě také průrazného napětí.

6.1 Standardizace (normy)

Všechny prováděné měření jsou standardizována Českou technickou Normou, konkrétně se jedná o normy ČSN IEC 250 a ČSN EN 60156 [5],[24], která pojednávají o měření ztrátového činitele, permitivity a průrazného napětí u elektroizolačních materiálů.

6.2 Měření $\tan \delta$, ϵ_r

Pro měření těchto parametrů je možno použít několik metod [5], mezi nejpoužívanější a hojně využívané patří metody můstkové. Cílem každého měření je určení prvků náhradního schématu dielektrika (*Obr. 6.1*).



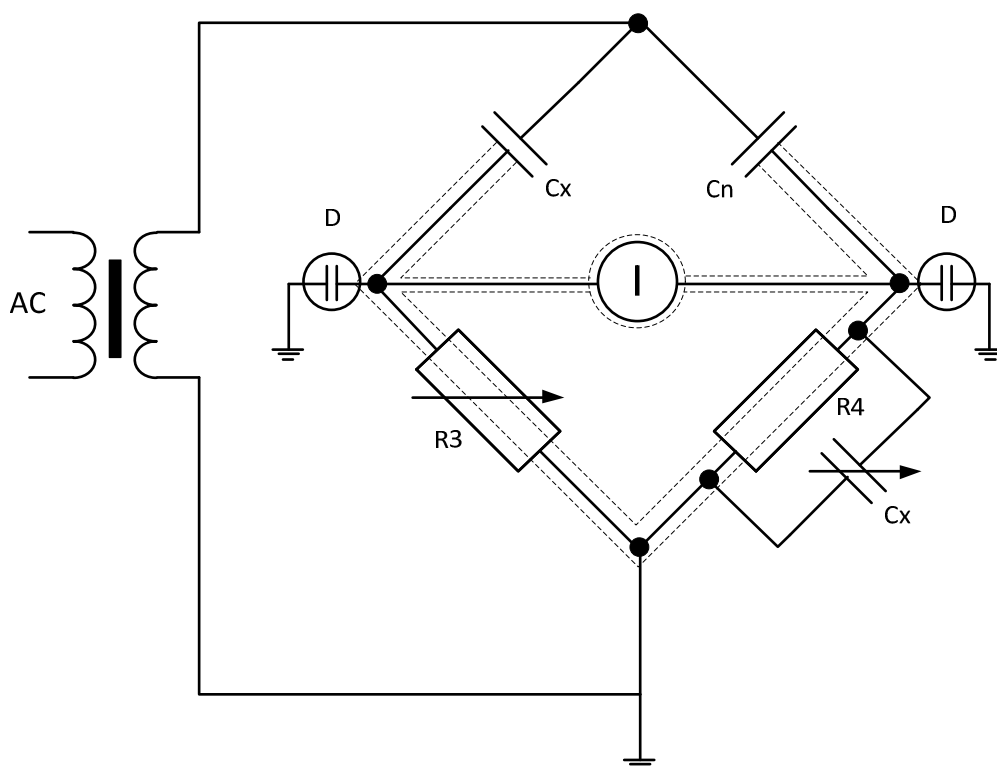
Obr. 6.1 - Náhradní schéma elektroizolačního materiálu s dielektrickými ztrátami - převzato z [5, s.5]

Na výše zmíněné elektrické parametry působí několik faktorů, které ovlivňují tyto vlastnosti. Pro získání objektivních dat je nutné uvažovat a měřit vliv kmitočtu, napětí a teploty. Pro měření na síťovém kmitočtu jsou vhodné, dříve zmíněné můstkové metody, přesněji řečeno metoda Scheringova můstku [5, s.5], [2, s.43].

- **Scheringův můstek**

Tento můstkový přístroj je vhodný pro měření permitivity a tangenty ve frekvenčním rozsahu průmyslových kmitočtů (50 ÷ 60 Hz) až do 100 kHz. Hodnota měřených kapacit by měla být v rozsahu 50 ÷ 1000 pF.

Můstek (*Obr. 6.2*) se skládá ze dvou základních částí, respektive čtyř větví. První část je tvořena vysokonapětovou zkušebnou, druhou část tvoří vyvažovací prvky, které jsou umístěny mimo vysokonapětovou část a jsou galvanicky odděleny měřeným vzorkem v elektrodovém systému a kapacitním normálem.



Obr. 6.2 - Scheringův můstek - převzato z [2, s.44]

Požadavky na vysokonapěťový zdroj jsou takové, aby poskytoval dostatečný výkon a napětí sinusového průběhu, jelikož měření probíhá v rozsahu 250 - 1000 V.

Nízkonapěťová vyvažovací část měřícího můstku využívá odporovou a kapacitní dekádu R_3 , C_4 , které vyrovnávají kapacitní resp. odporové složky náhradního obvodu. Dosažení vyváženého stavu celého systému je signalizováno nulovým indikátorem, označovaným I.

Pro vyvážený Scheringův můstek [2, s.43 - s.44], [5, s.14] platí (30) a (31):

$$C_X = C_S = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (30)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_S R_S = \omega R_4 C_4 \quad (31)$$

Další důležitou součástí měřicího systému je elektroodový systém, v našem případě byl použit systém značky Tettex, sestávající ze 2 částí. První částí je samotná testovací cela (Obr. 6.3) o kapacitě 60 pF.

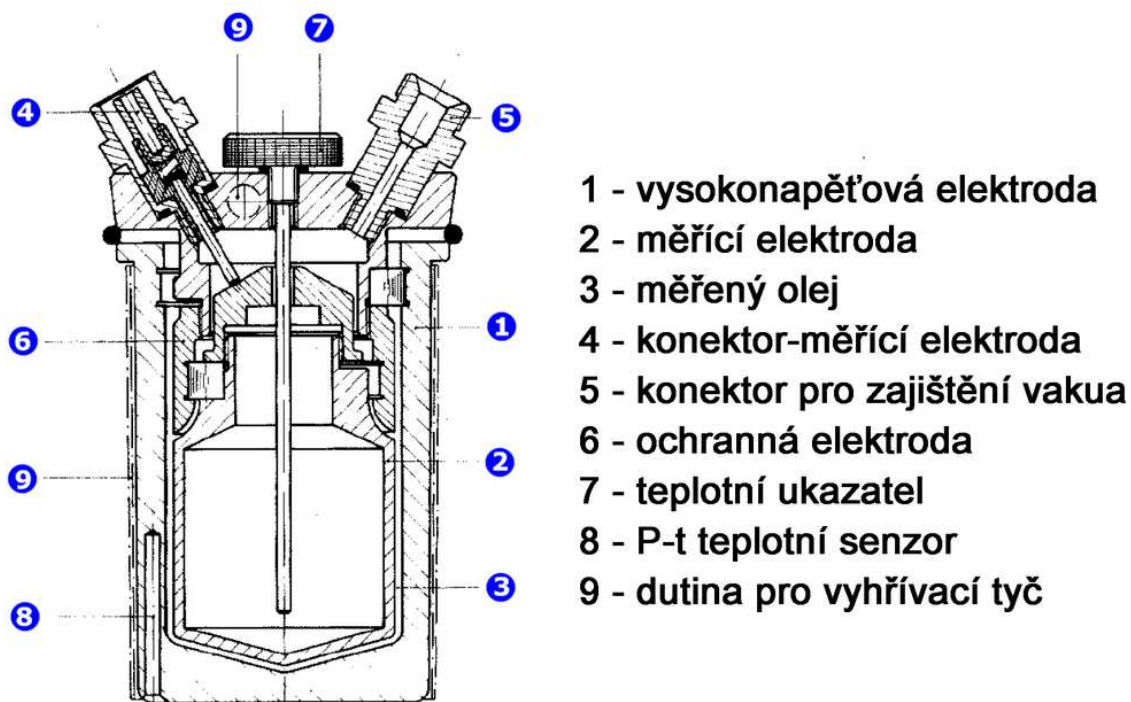


Obr. 6.3 - Testovací cela o kapacitě 60 pF - převzato z [25, s.2]



Obr. 6.4 - Vyhřívací nádoba - převzato z [25, s.2]

Druhá část je tvořena vyhřívací nádobou (Obr. 6.4), která je připojena k regulátoru teploty, k teplotnímu můstku a jedné svorce měřicího napětí.



Obr. 6.5 - Řez elektrodovým systémem Tettex - převzato z [25, s.2]

Měření jednotlivých vzorků olejů, které byly předem vysušeny, z důvodu předcházení nechtěného navlhání oleje a tím zkreslení měřených dat, probíhalo dle následujícího postupu. Vzorek vysušeného oleje o objemu 40 ml byl nalit do testovací cely, která byla v co nejkratším možném čase uzavřena, z důvodu minimalizace navlhnutí měřeného média. Dalším krokem bylo umístění cely do měřicí nádoby a připojení všech potřebných přístrojů.

Každý měřený vzorek byl proměřen pro 5 ÷ 7 hodnot teploty v rozmezí od pokojové teploty do 90 °C. Navíc při každé teplotě probíhalo měření pro čtyři různá napětí (250, 500, 750 a 1000 V). Tímto postupem bylo změřeno nejprve 7 „suchých“ vzorků oleje (Tabulka 4).

Tabulka 4 - Měřené vzorky izolačních olejů

| Rostlinný olej | Minerální olej | Syntetický olej |
|-------------------------------|----------------|---------------------|
| řepkový olej - TESCO | Shell Diala DX | syntetický Ester_v1 |
| řepkový olej - Preol | | syntetický Ester_v2 |
| slunečnicový olej - Promienna | | syntetický Ester_v3 |

Při každé změně teploty nebo napětí bylo nutné můstek vyvážit, tak aby indikátor I zobrazoval nulovou hodnotu. Po vyvážení můstku následovalo odečtení hodnot $\text{tg } \delta$ a hodnoty kapacity C_4 . Pro dosažení požadovaných výsledků bylo tedy zapotřebí dopočítat hodnotu permitivity (32) a (33), dle následujících vzorců:

$$\varepsilon_r = \frac{C_X}{C_0} \quad (32)$$

$$C_X = \frac{100}{C_4} \quad (33)$$

Po dopočtení požadovaných hodnot permitivity a ztrátového činitele, je možné zobrazit průběhy v grafických závislostech a porovnat jednotlivé druhy elektroizolačních kapalin a změnu jejich chování vlivem změny teploty nebo přiloženého napětí.

Pro bližší pochopení dané problematiky je vhodné na tomto místě uvést vzorový výpočet relativní permitivity (34) a (35).

řepkový olej - TESCO:

teplota $T = 23^\circ\text{C}$ napětí $U = 500 \text{ V}$ $\text{tg } \delta = 0,01076$ $C_4 = 0,40642 \text{ } \mu\text{F}$ $C_0 = 60 \text{ pF}$

$$C_X = \frac{100}{C_4} = \frac{100}{0,40642} = 246,051 \text{ pF} \quad (34)$$

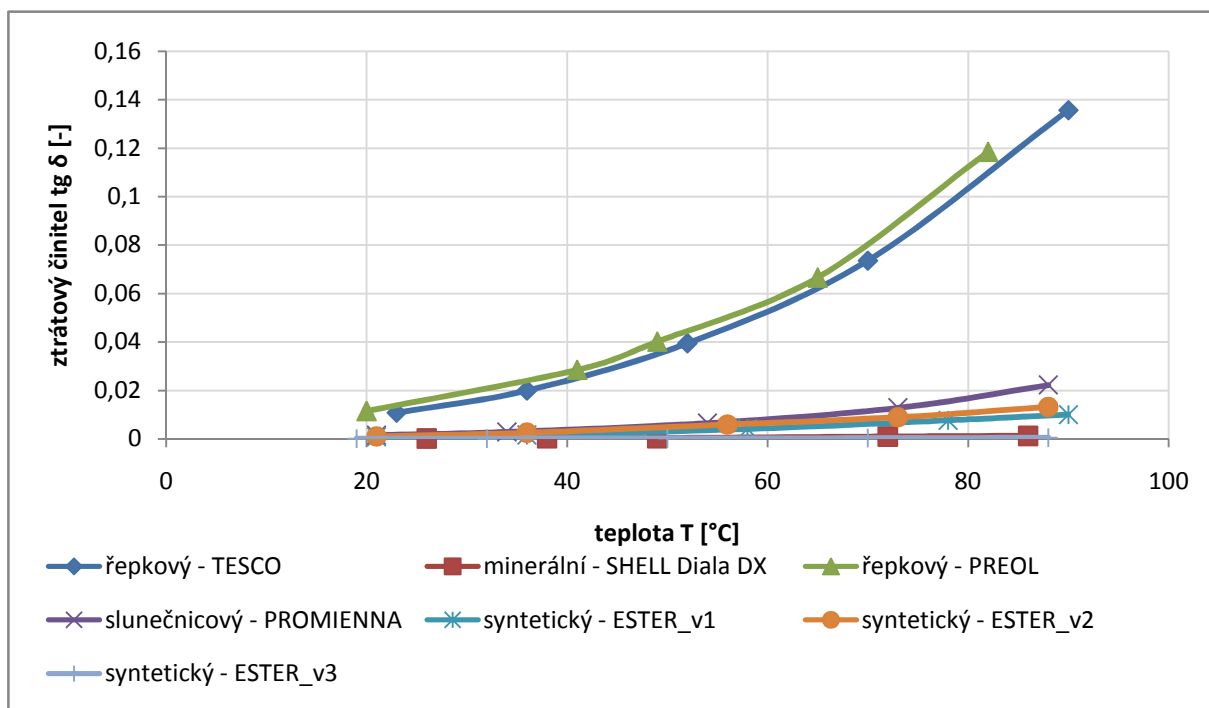
$$\varepsilon_r = \frac{C_X}{C_0} = \frac{246,051}{60} = 4,1008 [-] \quad (35)$$

V následující tabulce (*Tabulka 5*) jsou zobrazeny naměřené a dopočítané hodnoty permitivity a ztrátového činitele pro 7 vzorků izolačních olejů při napětí 500 V.

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty ztrátového činitele a relativní permitivity

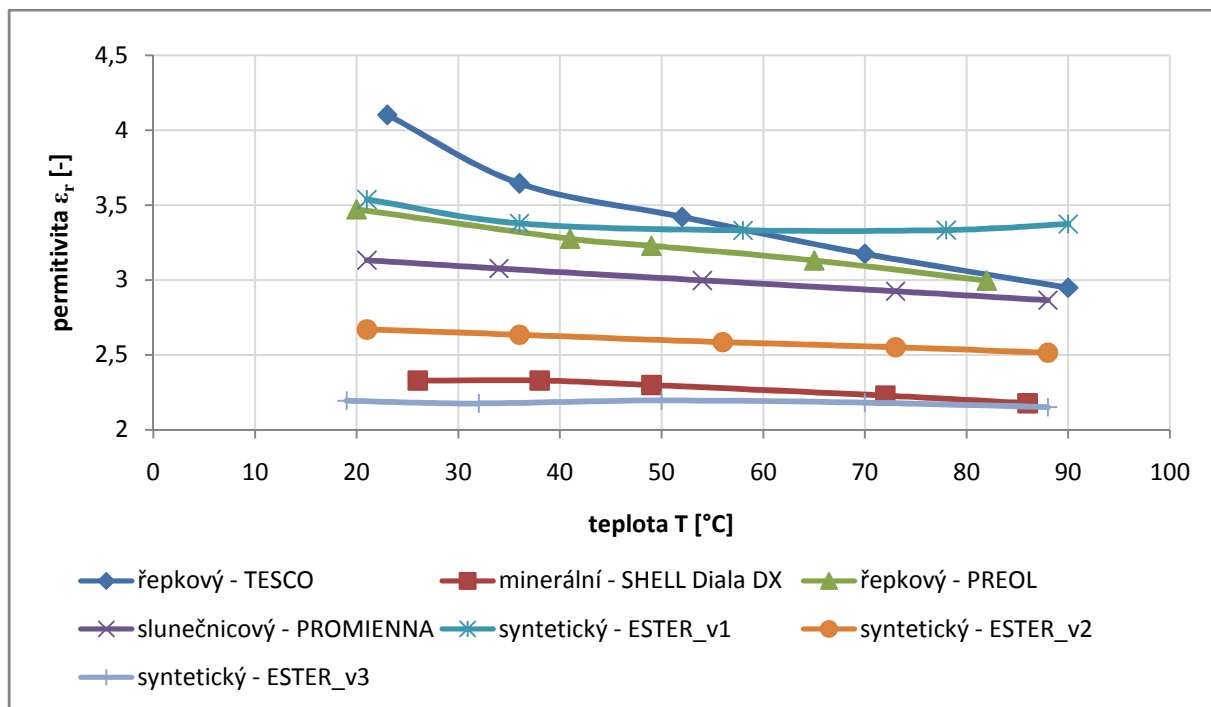
| název | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ϵ_r [-] |
|---|--------|-------|----------|------------------|
| řepkový - TESCO | 23 | 500 | 0,01076 | 4,1008 |
| | 36 | 500 | 0,01993 | 3,6444 |
| | 52 | 500 | 0,03941 | 3,4212 |
| | 70 | 500 | 0,07354 | 3,1757 |
| | 90 | 500 | 0,13565 | 2,9482 |
| minerální - SHELL Diala DX | 26 | 500 | 0,00014 | 2,3299 |
| | 38 | 500 | 0,00023 | 2,3301 |
| | 49 | 500 | 0,00029 | 2,2990 |
| | 72 | 500 | 0,00095 | 2,2290 |
| | 86 | 500 | 0,00126 | 2,1785 |
| řepkový - PREOL | 20 | 500 | 0,01147 | 3,4727 |
| | 41 | 500 | 0,02846 | 3,2761 |
| | 49 | 500 | 0,04013 | 3,2282 |
| | 65 | 500 | 0,06659 | 3,1303 |
| | 82 | 500 | 0,11843 | 2,9951 |
| slunečnicový - PROMIENNA | 21 | 500 | 0,00149 | 3,1328 |
| | 34 | 500 | 0,00283 | 3,0774 |
| | 54 | 500 | 0,00645 | 2,9968 |
| | 73 | 500 | 0,01275 | 2,9253 |
| | 88 | 500 | 0,02219 | 2,8662 |
| syntetický - ESTER_v1 | 21 | 500 | 0,00091 | 3,5370 |
| | 36 | 500 | 0,00163 | 3,3779 |
| | 58 | 500 | 0,00411 | 3,3311 |
| | 78 | 500 | 0,00765 | 3,3329 |
| | 90 | 500 | 0,00999 | 3,3733 |
| syntetický - ESTER_v2 | 21 | 500 | 0,00105 | 2,6698 |
| | 36 | 500 | 0,00256 | 2,6344 |
| | 56 | 500 | 0,00594 | 2,5852 |
| | 73 | 500 | 0,00893 | 2,5509 |
| | 88 | 500 | 0,01316 | 2,5150 |
| syntetický - ESTER_v3 | 19 | 500 | 0,00006 | 2,1954 |
| | 32 | 500 | 0,00010 | 2,1764 |
| | 50 | 500 | 0,00023 | 2,1967 |
| | 70 | 500 | 0,00026 | 2,1822 |
| | 88 | 500 | 0,00044 | 2,1515 |

Níže uvedený obrázek (Obr. 6.6) znázorňuje závislost ztrátového činitele na teplotě při 500 V u měřených izolačních olejů.



Obr. 6.6 - Naměřené hodnoty ztrátového činitele v závislosti na teplotě různých izolačních kapalin při napětí 500 V

Další grafická závislost (Obr 6.7) pak ukazuje teplotní závislost permitivity u měřených olejů.



Obr. 6.7 - Naměřené hodnoty permitivity v závislosti na teplotě různých izolačních kapalin při napětí 500 V

Zhodnocení naměřených dat

V tomto bodě probíhalo měření ztrátového činitele a permitivity u sedmi vysušených vzorků elektroizolačních kapalin. V obou sledovaných parametrech se naplnily předpoklady, kdy rostlinné oleje, zejména pak řepkový prokázaly své zhoršené vlastnosti vlivem zvýšení teploty. Na předchozích grafech je možno pozorovat, že průběh ztrátového činitele v případě řepkových olejů roste s teplotou téměř exponenciálně.

Na druhou stranu, velmi dobré výsledky vykazoval slunečnicový olej, jehož naměřené hodnoty se dají téměř srovnat s ostatními typy olejů. Také zkoušené typy syntetických esterů vykazovali velmi dobré vlastnosti, v případě Ester_v3 byly naměřeny nejlepší hodnoty jak v případě ztrátového činitele, tak v případě permitivity.

V druhém sledovaném parametru byly opět nejhorší výsledky u řepkového oleje, ale navíc zde nevychází uspokojivé hodnoty u vzorku Ester_v1. Na druhou stranu je potřeba říci, že v tomto případě všechny hodnoty splňují určité předpoklady permitivity pohybující se v rozmezí hodnot $2 \div 4$.

- **porovnání s dielektrickou spektroskopií**

Dielektrická spektroskopie je nedestruktivní diagnostická metoda pro měření vlastností dielektrických materiálů. V principu tato metoda funguje tak, že sleduje odezvy polarizace částic daného materiálu vlivem frekvenční změny vnějšího elektrického pole. Tímto způsobem je tedy možné sledovat a zaznamenat změnu permitivity a dielektrických ztrát vlivem změny frekvence [26, s.62].

V rámci jiného projektu, který probíhá na katedře a zabývá se měřením elektrických parametrů elektroizolačních kapalin metodou dielektrické spektroskopie, byla dodána naměřená data několika vzorků izolačních olejů, které se shodují se vzorky měřenými v rámci této práce. Výsledkem této skutečnosti je porovnání dvou nezávislých měření permitivity a ztrátového činitele u několika vzorků transformátorových olejů.

Měření dielektrickou spektroskopií probíhá na přístroji německé firmy Novocontrol, při následujících parametrech:

- teplotní rozsah: $-50 \div +90$ °C krok 20 °C
- frekvenční rozsah $5 \cdot 10^{-3} \div 10^7$ Hz
- objem testovaného oleje 20 μ l
- napětí 1 V

Při porovnání s metodou Scheringova můstku je tedy potřeba vyfiltrovat pouze potřebné parametry, jelikož měření můstkovou metodou probíhá při síťovém kmitočtu, je potřeba vybrat příslušný kmitočet z naměřených dat. V tomto případě byla nejbližší hodnota 54,877 Hz. Teplotní rozsah byl poté zúžen na teploty od 30 do 90 °C. Naopak z naměřených dat můstkovou metodou byly vybrány pouze hodnoty měřené při nejnižším napětí 250 V.



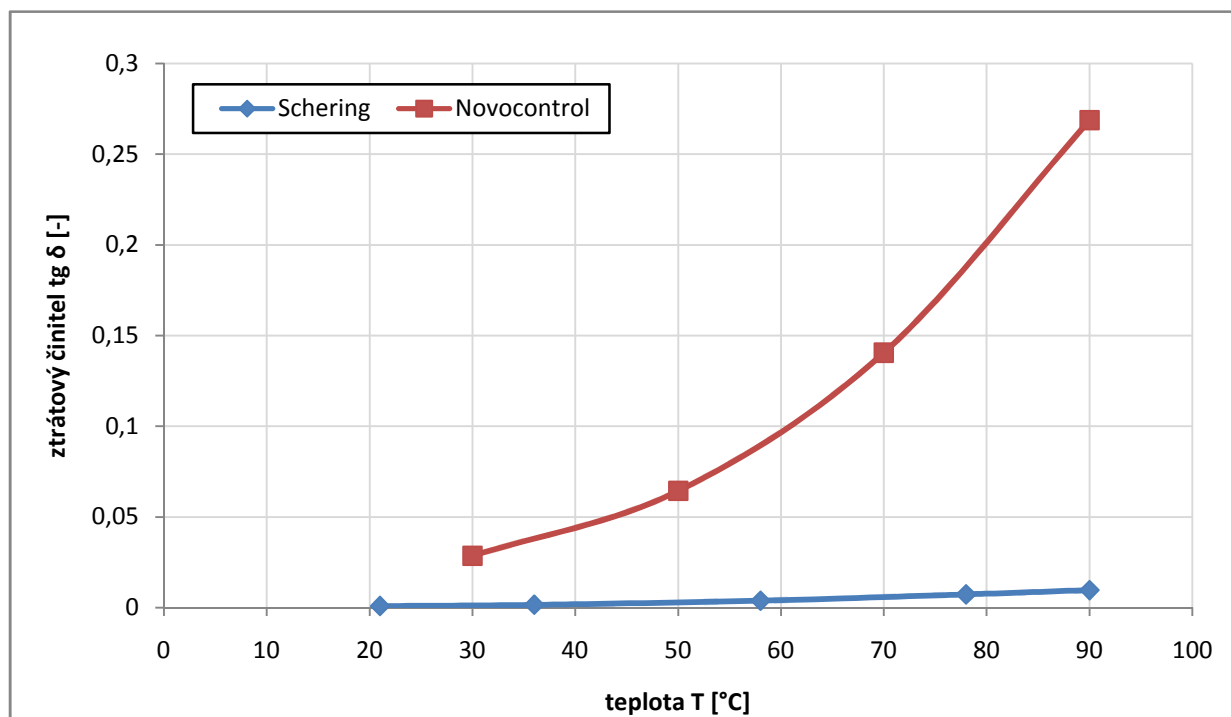
Obr. 6.8 - Měřicí systém Novocontrol

V následující tabulce (*Tabulka 6*) jsou porovnávány hodnoty elektrických parametrů několika vzorků izolačních olejů měřených můstkovou metodou a metodou dielektrické spektroskopie.

Tabulka 6 - Porovnání naměřených dat Scheringovou metodou a metodou dielektrické spektroskopie

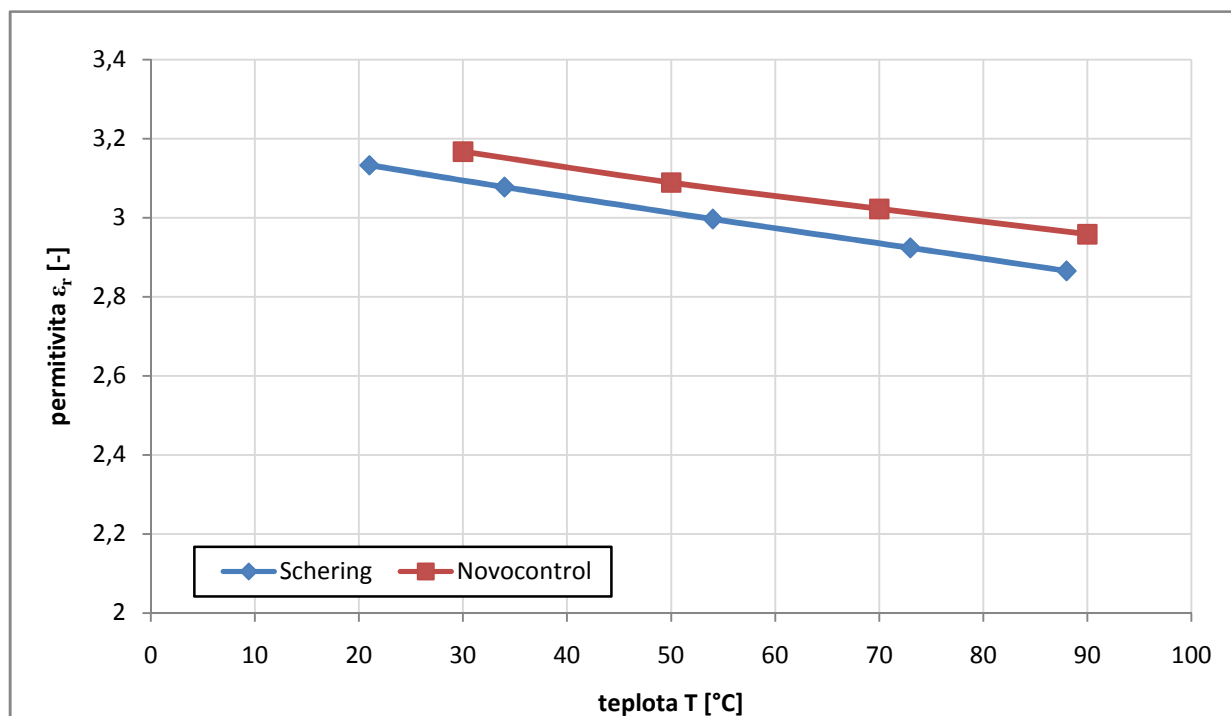
| název | Schering | | | | Novocontrol | | | |
|-------------------------------|----------|-------|----------|--------------------|-------------|-------|----------|--------------------|
| | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ε _r [-] | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ε _r [-] |
| řepkový - TESCO | 23 | 250 | 0,01034 | 4,1010 | 30 | 1 | 0,03815 | 3,2307 |
| | 36 | 250 | 0,01912 | 3,6444 | 50 | 1 | 0,07585 | 3,1568 |
| | 52 | 250 | 0,03867 | 3,4177 | 70 | 1 | 0,14325 | 3,1013 |
| | 70 | 250 | 0,07404 | 3,1707 | 90 | 1 | 0,24941 | 3,0302 |
| | 90 | 250 | 0,13388 | 2,9468 | | | | |
| minerální - SHELL Diala DX | 26 | 250 | 0,00014 | 2,3290 | 30 | 1 | 0,00105 | 2,2693 |
| | 38 | 250 | 0,00022 | 2,3298 | 50 | 1 | 0,00197 | 2,2513 |
| | 49 | 250 | 0,00029 | 2,2995 | 70 | 1 | 0,00389 | 2,2340 |
| | 72 | 250 | 0,00094 | 2,2219 | 90 | 1 | 0,00800 | 2,2213 |
| | 86 | 250 | 0,00126 | 2,1765 | | | | |
| řepkový - PREOL | 20 | 250 | 0,01125 | 3,4724 | 30 | 1 | 0,03177 | 2,8532 |
| | 41 | 250 | 0,02771 | 3,2753 | 50 | 1 | 0,09373 | 2,8067 |
| | 49 | 250 | 0,03947 | 3,2263 | 70 | 1 | 0,19845 | 2,7584 |
| | 65 | 250 | 0,06587 | 3,1140 | 90 | 1 | 0,30736 | 2,7195 |
| | 82 | 250 | 0,11838 | 2,9840 | | | | |
| slunečnicový - PROMIENNA | 21 | 250 | 0,00150 | 3,1329 | 30 | 1 | 0,00700 | 3,1672 |
| | 34 | 250 | 0,00283 | 3,0772 | 50 | 1 | 0,02250 | 3,0889 |
| | 54 | 250 | 0,00636 | 2,9965 | 70 | 1 | 0,05027 | 3,0221 |
| | 73 | 250 | 0,01256 | 2,9235 | 90 | 1 | 0,07343 | 2,9584 |
| | 88 | 250 | 0,02200 | 2,8653 | | | | |
| syntetický - ESTER_v1 | 21 | 250 | 0,00091 | 3,5345 | 30 | 1 | 0,02862 | 2,9562 |
| | 36 | 250 | 0,00159 | 3,3765 | 50 | 1 | 0,06440 | 2,8995 |
| | 58 | 250 | 0,00383 | 3,3275 | 70 | 1 | 0,14057 | 2,8499 |
| | 78 | 250 | 0,00727 | 3,3195 | 90 | 1 | 0,26880 | 2,8031 |
| | 90 | 250 | 0,00961 | 3,3562 | | | | |
| syntetický - ESTER_v2 | 21 | 250 | 0,00107 | 2,6697 | 30 | 1 | 0,00416 | 2,0851 |
| | 36 | 250 | 0,00257 | 2,6347 | 50 | 1 | 0,01266 | 2,0766 |
| | 56 | 250 | 0,00586 | 2,5851 | 70 | 1 | 0,03434 | 2,0693 |
| | 73 | 250 | 0,00874 | 2,5513 | 90 | 1 | 0,08330 | 2,0640 |
| | 88 | 250 | 0,01268 | 2,5158 | | | | |
| syntetický - ESTER_v3 | 19 | 250 | 0,00006 | 2,1952 | 30 | 1 | 0,02862 | 2,9562 |
| | 32 | 250 | 0,00015 | 2,1743 | 50 | 1 | 0,06440 | 2,8995 |
| | 50 | 250 | 0,00023 | 2,1934 | 70 | 1 | 0,14057 | 2,8499 |
| | 70 | 250 | 0,00028 | 2,1818 | 90 | 1 | 0,26880 | 2,8031 |
| | 88 | 250 | 0,00040 | 2,1479 | | | | |

Na prvním obrázku (Obr. 6.9) je zobrazeno porovnání ztrátových činitelů měřených odlišnými metodami.



Obr. 6.9 - Porovnání jednotlivých metod měření ztrátového činitele v závislosti na teplotě – Ester_v1

Druhý graf (Obr. 6.10) zobrazuje porovnání permitivit podle měřicí metody.



Obr. 6.10 - Porovnání jednotlivých metod měření permitivity v závislosti na teplotě – slunečnicový olej

Zhodnocení naměřených dat

Jak je možné pozorovat na několika grafech, tak použití dvou různých metod nemusí vždy vykazovat stejné výsledné hodnoty. Zejména v případě měření ztrátového činitele jsou hodnoty nepříliš shodné, v některých případech se liší i o řád. Pokud se zaměříme na naměřené hodnoty uvedené v (*Tabulka 6*), lze sledovat určitý trend hodnot, a to takový, že hodnoty u měření přístrojem Novocontrol jsou vždy vyšší.

Tento jev může být způsoben několika faktory. Prvním, který bych uvažoval, je zkreslení naměřených dat vlivem napětí jelikož rozdílnost napěťových hladin, při kterých probíhalo měření je zcela zásadní.

Druhým faktorem, dle mého názoru důležitějším, je skutečnost měřeného množství. Jelikož při měření můstkovou metodou má vzorek objem 40 ml, minimalizuje se zde možnost hygroskopicity vodou při manipulaci. Naopak v případě dielektrické spektroskopie se pracuje se vzorkem o objemu 20 μl , který je více náchylný k navlhání, proto se domnívám, že naměřená odlišnost je způsobena tímto faktem.

6.3 Měření průrazného napětí

V úvodní části kapitoly (*odstavec 6*) bylo zmíněno, že dalším velmi důležitým parametrem dielektrických prvků je hodnota průrazného napětí, která slouží k určení elektrické pevnosti daného materiálu.

Metoda měření je popsána v normě [24], která specifikuje celý postup měření a požadavky na měřicí systém a vlastnosti zkoušeného materiálu.

Princip měření

K dosažení zkušebního napětí se používá střídavý zdroj s plynulou regulací. Hlavním požadavkem na zdroj je plynulé zvyšování zkušebního napětí bez překmitů a přechodů. Dále je zapotřebí sinusový průběh, jehož maximální odchylku určuje norma [24]. Celý systém funguje automaticky tak, že při dosažení průrazného napětí, tj. napětí kdy, dojde k přeskoku mezi elektrodami, se přeruší napětí. K tomuto odpojení musí dojít do 10 ms [24, s.7 - s.8].

Požadavky na měřicí komoru:

- objem 350 ÷ 600 ml
- materiál elektrický izolant, průhledný, chemicky netečný (epoxidová pryskyřice nebo Methylmethakrylát)
- elektrody mosaz, bronz nebo austenitická korozivzdorná ocel
tvar sférický nebo částečně sférický
- vzdálenost elektrod $2,5 \pm 0,05$ mm

[24, s.8 -s.9]

Postup zkoušky

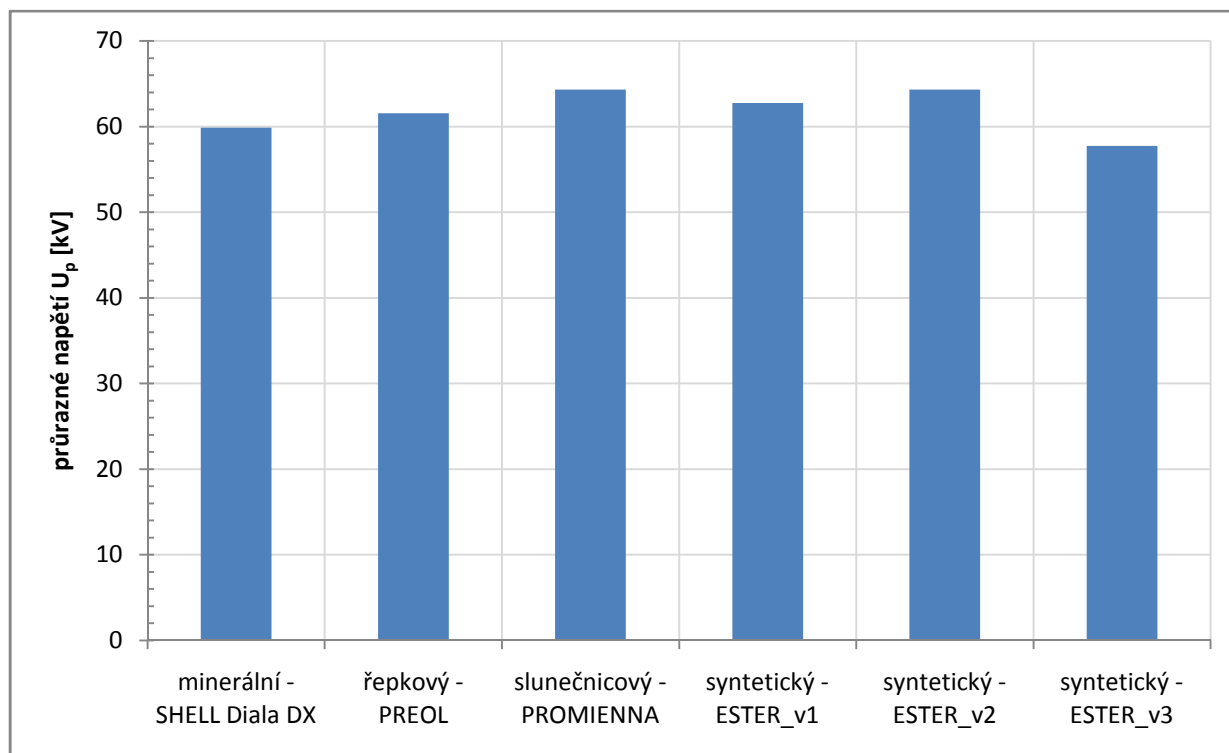
Po naplnění komory, která je blíže specifikována v [24], testovaným vzorkem se náplň promíchá, aby byla zajištěna dostatečná homogenita testovaného médi. Poté je připojeno zkušební napětí, které se zvyšuje z počáteční hodnoty rychlostí 2 kV/s až do okamžiku průrazu. Tato hodnota je zaznamenána. Měření jednoho vzorku se opakuje 6x, kdy je nutné mezi každým opakováním dodržovat přestávku min 2 minuty. Výsledkem měření je průměrná hodnota ze šesti naměřených hodnot průrazného napětí [24, s.10 - s.11].

V tabulce (Tabulka 7) jsou zaznamenány naměřené hodnoty jednotlivých typů izolačních kapalin.

Tabulka 7 - Naměřené hodnoty průrazných napětí

| název | minerální - SHELL Diala DX | řepkový - PREOL | slunečnicový - PROMIENNA | syntetický - ESTER_v1 | syntetický - ESTER_v2 | syntetický - ESTER_v3 |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| U _p [kV] měření 1 ÷ 6 | 60,78 | 66,18 | 59,97 | 81,79 | 59,97 | 51,83 |
| | 60,39 | 65,36 | 57,25 | 65,97 | 57,25 | 58,19 |
| | 54,52 | 63,26 | 69,00 | 59,33 | 69,00 | 58,49 |
| | 56,54 | 55,84 | 69,81 | 65,85 | 69,81 | 54,97 |
| | 68,45 | 57,66 | 72,35 | 52,71 | 72,35 | 59,76 |
| | 58,53 | 61,05 | 57,47 | 50,92 | 57,47 | 63,26 |
| průměr | 59,87 | 61,56 | 64,31 | 62,76 | 64,31 | 57,75 |
| směrodatná odchylka | 4,82 | 4,17 | 6,82 | 11,27 | 6,82 | 3,95 |
| variační koeficient | 8,05 % | 6,77 % | 10,60 % | 17,96 % | 10,60 % | 6,84 % |

Následující graf (Obr. 6.11) pak ukazuje vynesené hodnoty průrazného napětí jako průměr šesti po sobě jdoucích měření.



Obr. 6.11 - Naměřené hodnoty průrazných napětí různých izolačních kapalin dle ČSN EN 60156

Zhodnocení naměřených dat

V případě měření průrazných napětí u šesti různých vzorků elektroizolačních kapalin dosahovaly všechny hodnoty téměř katalogových údajů. Například v případě minerálního oleje Shell Diala DX činí výsledná průměrná hodnota šesti opakování 59,87 kV. Katalogová hodnota udávaná výrobcem mírně přesahuje hodnotu 60 kV.

U dalších pěti sledovaných vzorků se hodnoty naměřeného průrazného napětí také téměř shodují s hodnotami katalogovými.

Největší odchýlení od ideálních hodnot je patrné při pohledu na hodnoty variačního koeficientu, který udává rozptyl měřených údajů. Tato odchylka je nejvíce patrné u vzorku Ester_v1, kde variační koeficient dosahuje hodnoty 17,96 %, což je nadlimitní hodnota.

6.4 Vliv vlhkosti na parametry elektroizolačních kapalin

Poslední experimentální zkouškou, prováděnou v rámci této diplomové práce, bylo testování charakteristických vlastností ovlivněných působením vlhkosti. Nejprve se opakovaly měření můstkovou metodou pro vyhodnocení ztrátového činitele a permitivity. Poté probíhalo měření průrazných napětí. Oba typy měření elektrických veličin byly provedeny dvakrát, již pro menší počet vzorků. Dvojití opakování bylo způsobeno rozdílnou aplikací vlhkosti do měřených vzorků.

Nejprve bylo aplikováno malé množství vodních kapek pomocí nastavitelné pipety. Aplikování probíhalo ve více krocích, abychom vytvořili více testovacích vzorků. Následně byly všechny vzorky zahřáté na teplotu cca 40 °C a magnetickou míchačkou rozmíchány s cílem rozpustit aplikovanou vodu v oleji.

Všechny vzorky byly připraveny třikrát z následujících důvodů:

1. měření permitivity a ztrátového činitele
2. měření průrazného napětí
3. ověření množství vody Karl-Fisherovou Coulometrickou titrací, fa. ORGREZ, a.s.

Následující tabulka (*Tabulka 8*) ukazuje všechny měřené vzorky a hodnoty obsahu vody zjištěné Coulometrickou titrací – zdroj ORGREZ, a.s.

Tabulka 8 - Měřené vzorky vlhkých olejů

| vzorek | obsah vody teor [ppm] | hustota | obsah vody teor [g] | obsah vody titrací [mg/kg] |
|-------------------|-----------------------|---------|---------------------|----------------------------|
| Slunečnicový olej | 5 | 0,92 | 4,585 | 275,7 |
| | 15 | 0,92 | 13,755 | 292,2 |
| | 30 | 0,92 | 27,51 | 329,6 |
| Minerální olej | 5 | 0,80 | 4 | 16,5 |
| | 10 | 0,80 | 8 | 17,9 |
| | 30 | 0,80 | 24 | 34,2 |
| Syntetický ester | 20 | 0,86 | 17,2 | 121,7 |
| | 100 | 0,86 | 86 | 227,7 |

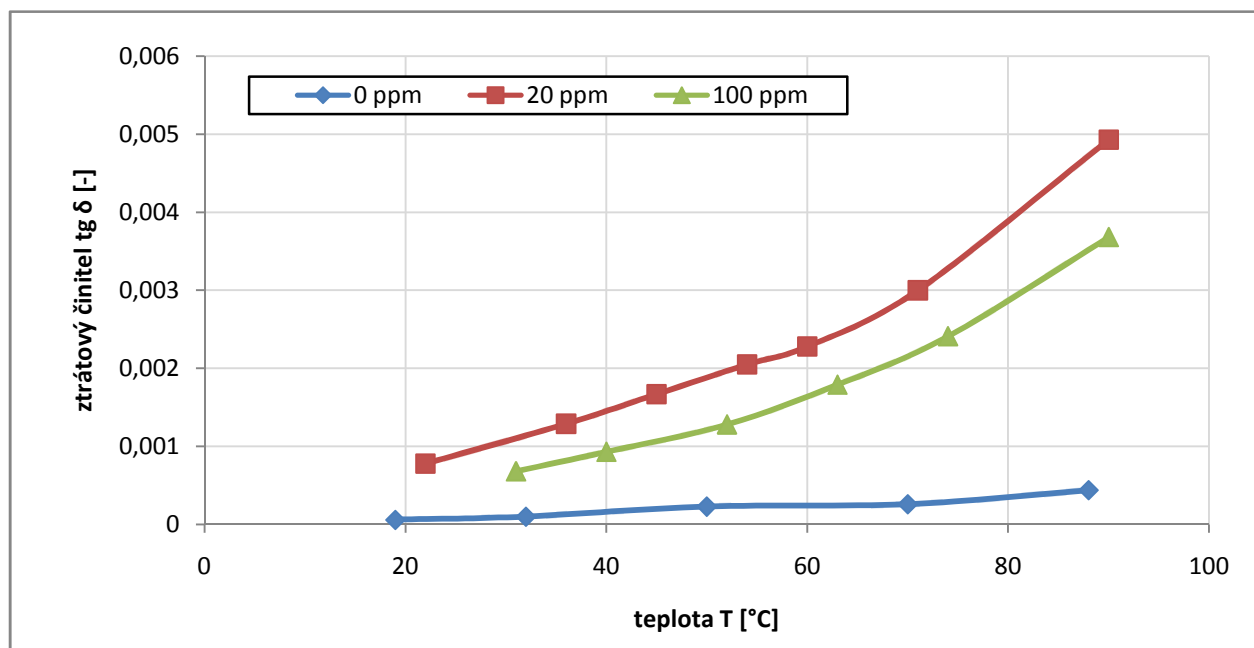
1. měření

V (Tabulka 9) jsou zaznamenány naměřené hodnoty permitivity a ztrátového činitele v průběhu prvního měření.

Tabulka 9 - porovnání vlastností suchého a vlhkého vzorku syntetického oleje

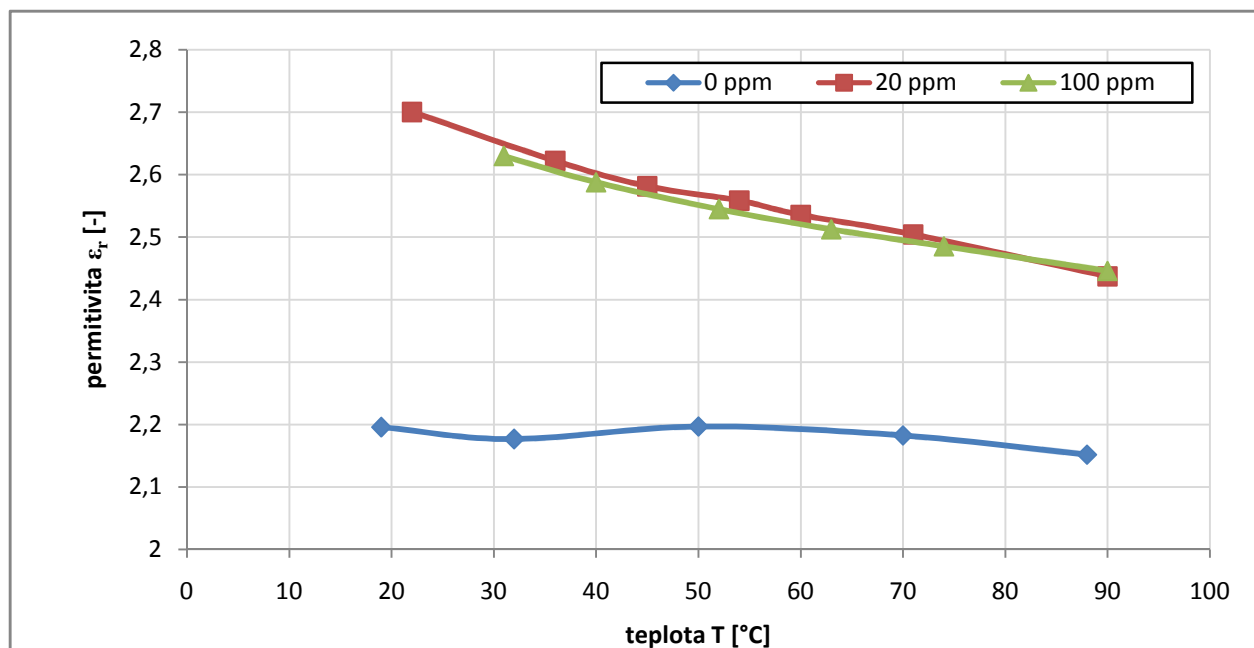
| Syntetický ester | | | | |
|------------------|--------|-------|----------|------------------|
| vlhkost | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ϵ_r [-] |
| 0 ppm | 19 | 500 | 0,00006 | 2,195409 |
| | 32 | 500 | 0,0001 | 2,17643 |
| | 50 | 500 | 0,00023 | 2,196682 |
| | 70 | 500 | 0,00026 | 2,182186 |
| | 88 | 500 | 0,00044 | 2,151482 |
| 20 ppm | 22 | 500 | 0,00078 | 2,700192 |
| | 36 | 500 | 0,00129 | 2,621988 |
| | 45 | 500 | 0,00167 | 2,581378 |
| | 54 | 500 | 0,00205 | 2,558199 |
| | 60 | 500 | 0,00228 | 2,535317 |
| | 71 | 500 | 0,003 | 2,504119 |
| | 90 | 500 | 0,00493 | 2,437075 |
| 100 ppm | 31 | 500 | 0,00068 | 2,629558 |
| | 40 | 500 | 0,00093 | 2,58767 |
| | 52 | 500 | 0,00128 | 2,544506 |
| | 63 | 500 | 0,00179 | 2,512575 |
| | 74 | 500 | 0,00241 | 2,485188 |
| | 90 | 500 | 0,00368 | 2,445873 |

První graf (Obr. 6.12) znázorňuje závislost $\text{tg } \delta$ na teplotě a různém poměru vody v oleji v rámci prvního měření.



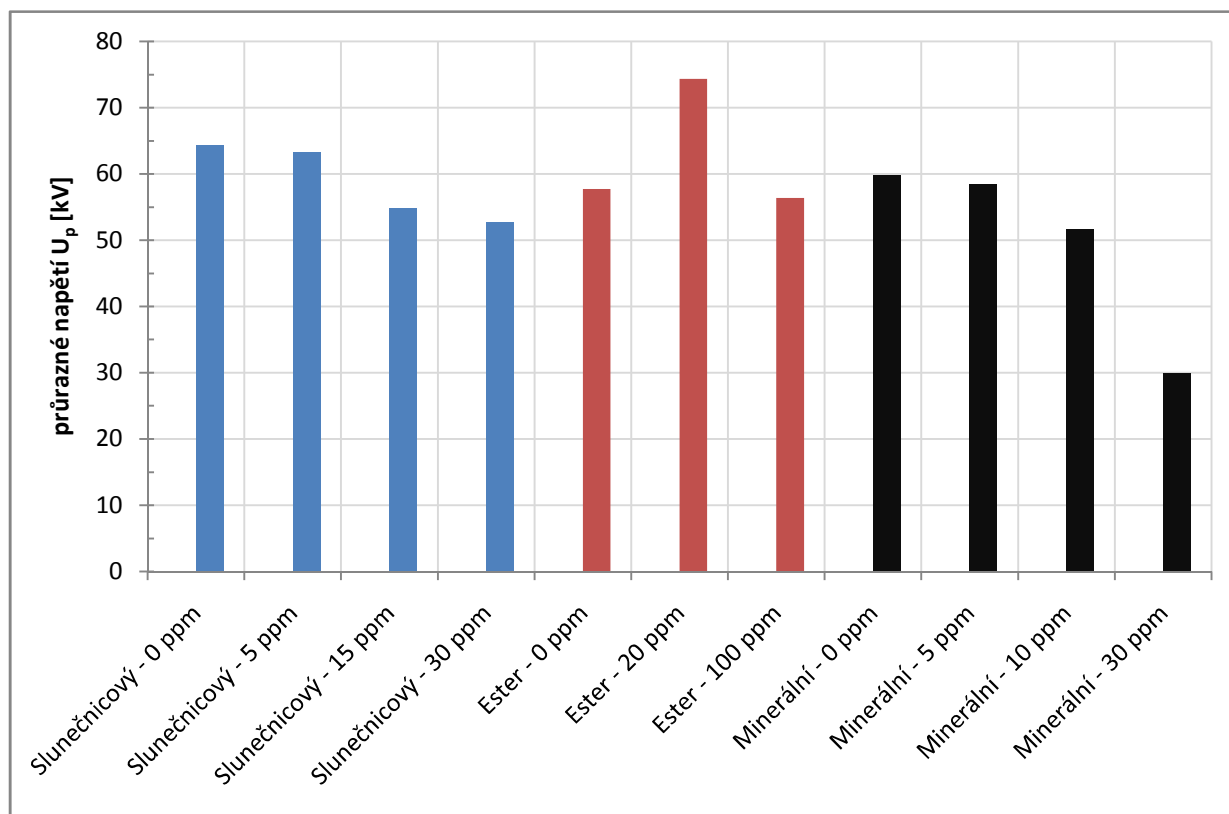
Obr. 6.12 - vliv vlhkosti na ztrátový činitel syntetického esteru

Další graf (Obr. 6.13) pak v závislosti na teplotě ukazuje průběh permitivity syntetického esteru při různých koncentracích vody a oleje.



Obr. 6.13 - vliv vlhkosti na permitivitu syntetického esteru

Poslední grafická závislost (Obr. 6.14) v rámci prvního měření znázorňuje hodnoty průrazného napětí ovlivněného obsahem vody.



Obr. 6.14 - vliv vlhkosti na hodnotu průrazného napětí

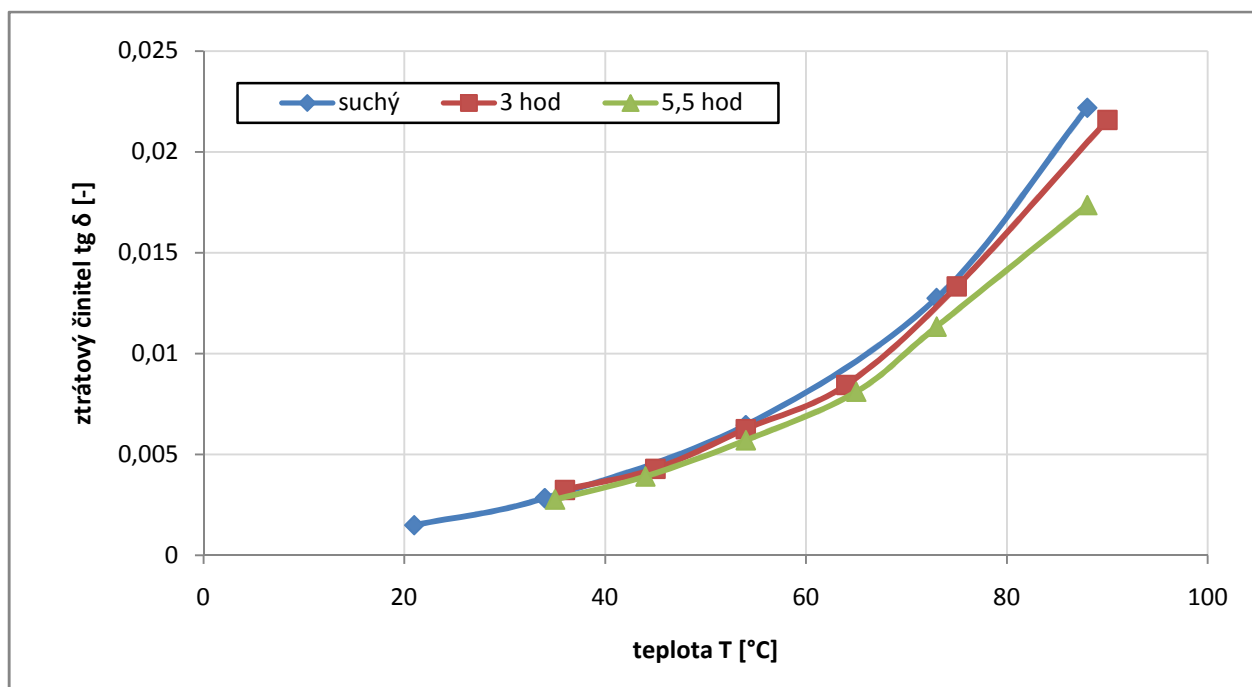
2. měření

Hodnoty z druhého měření byly získány tak, že vlhký olej byl sušen různou dobu v peci, s cílem dosáhnout rozdílného obsahu vody v oleji. Jako třetí, referenční hodnoty byly použity dříve naměřené hodnoty „suchých“ olejů. Naměřené a dopočítané hodnoty permitivity a ztrátového činitele ukazuje následující tabulka (*Tabulka 10*).

Tabulka 10 - porovnání vlastností suchého a vlhkého vzorku slunečnicového oleje

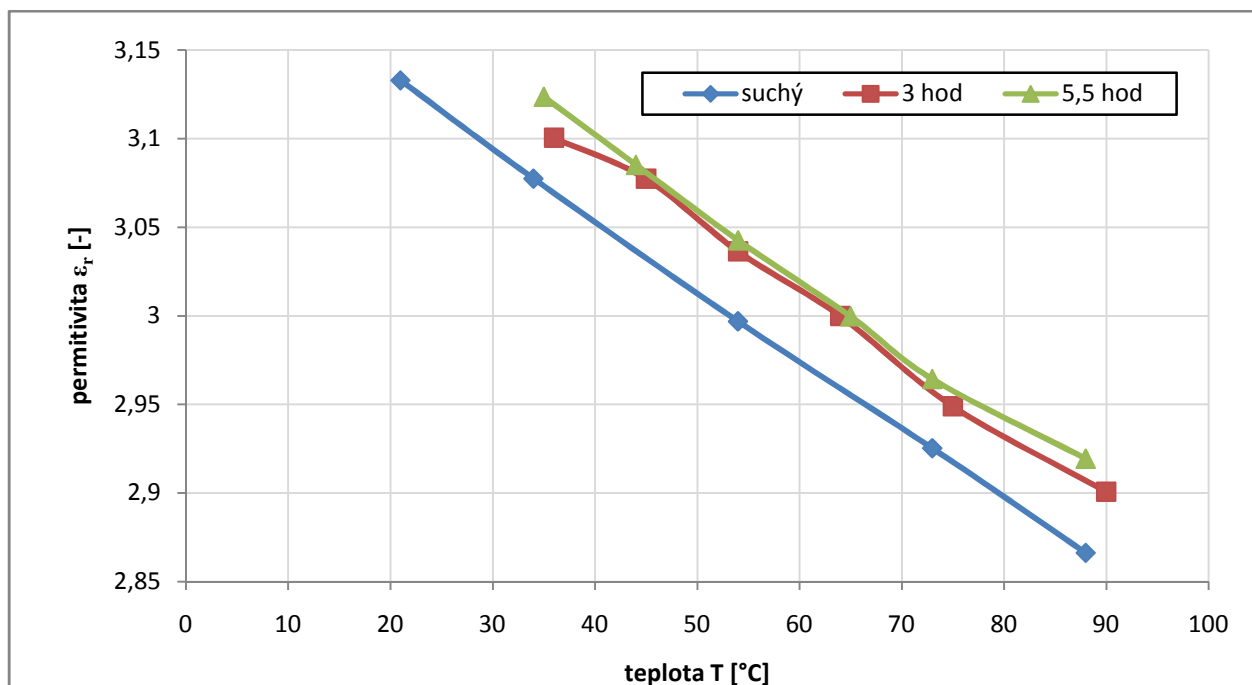
| Slunečnicový olej | | | | |
|-------------------|--------|-------|----------|------------------|
| sušení | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ϵ_r [-] |
| suchý | 21 | 500 | 0,00149 | 3,13283 |
| | 34 | 500 | 0,00283 | 3,07742 |
| | 54 | 500 | 0,00645 | 2,99685 |
| | 73 | 500 | 0,01275 | 2,92526 |
| | 88 | 500 | 0,02219 | 2,86620 |
| 3 hod | 36 | 500 | 0,00325 | 3,10043 |
| | 45 | 500 | 0,00429 | 3,07736 |
| | 54 | 500 | 0,00626 | 3,03632 |
| | 64 | 500 | 0,00845 | 2,99981 |
| | 75 | 500 | 0,01333 | 2,94891 |
| | 90 | 500 | 0,02158 | 2,90067 |
| 5,5 hod | 35 | 500 | 0,00277 | 3,12356 |
| | 44 | 500 | 0,00392 | 3,08516 |
| | 54 | 500 | 0,00571 | 3,04253 |
| | 65 | 500 | 0,00811 | 2,99965 |
| | 73 | 500 | 0,01134 | 2,96428 |
| | 88 | 500 | 0,01736 | 2,91932 |

V prvním grafu (Obr. 6.15) jsou zobrazeny naměřené hodnoty ztrátového činitele.



Obr. 6.15 - vliv doby sušení na ztrátový číselník slunečnicového oleje

Druhý graf (Obr. 6.16) znázorňuje závislost permitivity na teplotě a době sušení vlhkého izolační kapaliny na vzorku slunečnicového oleje.



Obr. 6.16 - vliv doby sušení na permitivitu slunečnicového oleje

Zhodnocení naměřených hodnot

Problematikou vlivu vlhkosti na měřené parametry se zabývá již v teoretický rozbor (*odstavec 3.3*), kde je uvedeno, že vlhkost v izolační kapalině způsobuje degradační pochody uvnitř struktury materiálu, a tím pádem změnu elektrických parametrů daného dielektrika.

Ze zobrazených grafů je patrné, že v případě 1. měření došlo u většiny testovaných vzorků ke zkreslení naměřených dat vlivem přesycení nad mez hygroskopicity, jak ukazuje kontrolní měření Coulometrickou titrací (*Tabulka 8*). V tomto případě, kdy je voda v oleji jak ve formě rozpouštěné, tak ve formě emulze, jsou měřené parametry ovlivněny nejvíce. Z tohoto důvodu nelze sledovat vývoj trendu hodnot zejména v případě měření permitivity a ztrátového činitele.

Při měření průrazného napětí jsou výsledky na lepší úrovni. Nejlépe v tomto případě vychází hodnoty slunečnicového oleje, kde je jasně patrný klesající trend hodnot průrazného napětí, který je způsoben částicemi vody ve struktuře látky a jejího nadměrného namáhání, v jehož důsledku dochází k přeskokům napětí. Také v případě minerálního oleje vykazují hodnoty sestupný trend. Při hodnotě nasycení 30 ppm je patrný značný pokles hodnoty průrazného napětí, a tím výrazné ovlivnění elektrické pevnosti materiálu.

Ve druhém opakování měření byl použit vlhký vzorek oleje, který byl sušen v peci různou dobu, s cílem dosažení různé koncentrace vody ve vzorku. Jako třetí, referenční hodnota posloužila hodnota dříve naměřeného suchého vzorku. Bohužel ani v tomto případě hodnoty zcela neodpovídají předpokladům, nicméně malý rozdíl mezi sušením 3 hodiny a 5,5 hodiny naznačuje, že vlhkost oleje se téměř neliší a malé difference mohly být způsobeny opětovným navlhnutím vzorku při manipulaci.

7 Závěr

Problematika elektroizolačních kapalin je velmi rozsáhlá a složitá. V rámci této diplomové práce bylo potřeba téma podstatným způsobem zúžit a soustředit se pouze na některé důležité a pro potřebu této práce vypovídající části.

V teoretické části byl proveden rozbor některých základních fyzikálních pochodů probíhajících v dielektriku, který je nezbytný pro pochopení dané problematiky.

Další části jsou již soustředěny na současný stav, zejména problém minerálních olejů a jejich špatné, respektive téměř nulové biologické rozložitelnosti. Dále na problém s neobnovitelnými zdroji, kterým dozajista ropa, jako základní složka těchto olejů je. Možným řešením obou výše uvedených nedostatků je zavedení rostlinných nebo syntetických olejů do běžného provozu, který je již dnes celkem dobře možný.

Pokud se blíže zaměříme na tyto druhy elektroizolačních kapalin, lze snadno vypočítat, že důkladným výběrem nebo modifikací ať už rostlinných nebo syntetických kapalin nebo jejich vzájemnou kombinací lze docílit dobrého stupně biologické odbouratelnosti. Výsledkem testování v rámci této práce je skutečnost, že všechny testované vzorky splňují požadovaný test dle OECD 301 D, navíc smíšením rostlinného slunečnicového oleje a syntetického esteru v požadovaném poměru bylo dosaženo téměř shodných hodnot jako u komerčního produktu Envirotemp FR3, jehož složení signalizuje, že použití rostlinného oleje jako základní složky v kombinaci s vhodným aditivem může nechat vzniknout velmi dobrému produktu, který může obstát v konkurenci minerálních olejů.

Další části předkládané práce se zabývají měřením elektrických parametrů, tj. permitivitou, ztrátovým činitelem a průrazným napětím. Z naměřených hodnot je jasně patrné, že kromě řepkového oleje, který v měření elektrických parametrů zcela nevyhověl, lze použít výše zmíněné míšení dobře dostupného a cenově velmi výhodného slunečnicového oleje s dražším syntetickým esterem, který velmi zlepšuje elektrické vlastnosti celé směsi.

V současné době, kdy už i parametry elektrické dosahují hodnot srovnatelných s konvenčními minerálními oleji, jak ukazují naměřené hodnoty (*Tabulka 8*), (*Obr. 6.6*) a (*Obr. 6.7*). Zejména pak srovnání minerálního oleje Shell Diala DX, jehož maximální hodnota ztrátového činitele při napětí 500 V a teplotě 86 °C činí 0,00126, s naměřenými hodnotami vzorku Ester_v3 (teplota 88 °C, $\tan \delta = 0,00044$). Ale i hodnoty u slunečnicového oleje

(88 °C a $\text{tg } \delta = 0,0222$) jsou na velmi dobré úrovni. Zároveň hodnoty teplotní závislosti permitivity jsou vysoce uspokojivé i v případě zmíněných rostlinných olejů (slunečnicový olej: $\text{tg } \delta = 2,866$, minerální olej: $\text{tg } \delta = 2,178$ a Ester_v3: $\text{tg } \delta = 2,151$).

V současné době je potřeba se zaměřit zejména na testování v reálných zařízeních, jak již v současné době činí společnost Siemens (*odstavce 5.2*) u svých transformátorů. Mezi další izolační kapaliny s dobrou biologickou odbouratelností, které se již používají v průmyslových aplikacích, patří produkty Envirotemp FR 3, MIDELEON a ABB Biotemp.

Z mého pohledu, posledním nevyřešeným problémem zůstává oxidační stabilita rostlinných, syntetických olejů nebo jejich kombinací. K dosažení potřebných hodnot tohoto parametru je potřeba do olejů přidávat stabilizační aditiva. Dle mého názoru je velmi důležité tuto oblast pečlivě prozkoumat, za účelem dosažení uspokojivých hodnot a následného běžného používání v komerční sféře.

Závěrečná část této práce je věnována vlivu vlhkosti na změnu parametrů. Změna vlastností je velmi markantní, navíc téměř nepředvídatelná, proto představuje velký problém, jak je patrné z provedených testů. Proto je z mého pohledu důležité co nejvíce minimalizovat riziko styku izolačního média se vzduchem, a tím pádem také vlhkostí.

8 Použitá literatura

- [1] Mentlík, V.; Dielektrické prvky a systémy, 1.vyd., BEN, Praha 2006, 235 stran, ISBN 80-7300-189-6
- [2] Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P.; Diagnostika elektrických zařízení, 1. vyd., BEN, Praha 2008, 439 stran, ISBN 978-80-7300-232-9
- [3] Drápala, J.; Kursá, M.; Elektrotechnické materiály, 1.vyd., VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2012, 439 stran, ISBN 978-80-248-2570-0
- [4] Mentlík, V.; Diagnostika izolantů, 1.vyd., VŠSE Plzeň, Plzeň 1986, 62 stran
- [5] ČSN IEC 250, Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek, Praha, Český normalizační institut, Leden 1998
- [6] Ježík, J.; Studium dielektrické relaxace v základních materiálech DPS a v izolacích kabelů, Diplomová práce, VUT Brno, 2011, 65 stran [online] Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/1749/xjezik01_diplomova_prace.pdf?sequence=1>
- [7] Kučerová, E.; Interakce a technologie prvků a systémů, Přednášky z předmětu KET/ITP
- [8] Morwitzová, G.; Klimatotechnologické zkušebnictví, Plzeň 2007, s.354-357 [online] Dostupné z: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/47.pdf>>
- [9] Trnka, P.; Polanský, R.; Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír, Plzeň 2007 [online] Dostupné z: <<http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c13.pdf>>
- [10] Schejbal, V.; Diagnostika transformátorů prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny, Disertační práce, ZČU Plzeň, 2007, 144 stran

- [11] Hájek, J.; Diagnostický systém pro studium aplikovatelnosti alternativních izolačních kapalin, Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2013, 78 stran [online] Dostupné z:
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/7455/Jan_Hajek_DP.pdf?sequence=>
- [12] Makówka, T.; Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin, Diplomová práce, VUT Brno, 2010, 62 stran [online] Dostupné z:
<<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/14464/Diplomova%20prace.pdf?sequence=1>>
- [13] Kudláček, I.; Fotochemická degradace, Přednáška z předmětu Ekologie průmyslu, ČVUT Praha, 2013 [online] Dostupné z:
<http://martin.feld.cvut.cz/~kudlacek/EKP/10_slunce.pdf >
- [14] Trnka, P.; Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Comparison of Simulated Life Cycles of Paper-oil Insulation Systems Based on Biodegradable Fluids; IEEE ICDL 2011, Trondheim, Norway
- [15] Oommen, T. V.; Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers, IEEE, 2002 [online] Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=981322&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D981322>
- [16] Technická směrnice č. 21 - 2009 - Mazací, teplotnosné a elektroizolační kapaliny pro oběhové systémy; Ministerstvo životního prostředí, Praha 2008 [online] Dostupné z:
<[http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/MZPMSFHMV9DV/\\$FILE/212009.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/MZPMSFHMV9DV/$FILE/212009.pdf)>
- [17] Hosier, I. L.; Vaughan, A. s.; Montjen, F. A.; Ageing of biodegradable oils for high voltage insulation systems, IEEE CEIDP 2006, Kansas City, USA
- [18] ČSN EN 61099 ed.2; Izolační kapaliny - Specifikace nepoužitých syntetických organických esterů pro elektrotechnické účely, Praha, Český normalizační institut, Červen 2011

- [19] OECD 301; Guideline for testing of chemicals, Ready Biodegradability, Červenec 1992
[online] Dostupné z:
<<http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/1948209.pdf>>
- [20] Material Safety Data Sheet; Envirotemp® FR3® fluid, Bulletin 980082, Waukesha,
Září 2011 [online] Dostupné z:
<http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/MSDS/98082_MSDS.pdf>
- [21] Jirásek, J.; Sivek, M.; Lázníčka, P.; Evidovaná ložiska nerostů ČR, 2009
[online] Dostupné z:
<http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/obr_loziska_cr/ropa.jpg>
- [22] Rostlinný olej do kuchyně i transformátoru; ©Siemens, s.r.o., Srpen 2013
[online] Dostupné z:
<https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/o_nas/inovace/Pages/olej-do-transformatoru.aspx>
- [23] ČSN EN 60296 ed.2; Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité minerální
izolační oleje pro transformátory a vypínače, Praha, Český normalizační institut,
Listopad 2012
- [24] ČSN EN 60156; Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu -
Zkušební metoda, Praha, Český normalizační institut, Červenec 1998
- [25] 2903; Test Cell for Liquid Insulants, Tettex Instruments, Haefely Test AG, Switzerland
[online] Dostupné z:
<http://www.haefely.com/pdf/LL_2903.pdf>
- [26] Ulrych, J.; Dielektrická spektroskopie v elektrotechnické diagnostice, Diplomová práce,
ZČU Plzeň, 2012, 192 stran [online] Dostupné z:
<<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2726/Dielektricka%20spektroskopie%20v%20elektrotechnologicke%20diagnostice.pdf?sequence=1>>

- [27] Mentlík, V.; Trnka, P.; Trnková, M.; Šašek, L.; Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, 1. vyd., BEN, Praha 2011, 120 stran, ISBN 978-80-7300-412-5
- [28] Gjaerde, A.C.; Multi Factor Ageing Models – Origin and Similarities, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 1, 1997 [online] Dostupné z:
<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=567392&queryText%3Dgjaerde+multifactor+ageing>>

Internetové stránky společností

- [29] www.mero.cz
- [30] www.shell.com
- [31] www.lucebni.cz
- [32] www.mimaterials.com
- [33] www.preol.cz
- [34] www.abb.com
- [35] www.cargill.com
- [36] www.paramo.cz
- [37] www.crc.cz
- [38] www.at-oil.cz
- [39] www.mnd.cz
- [40] www.novocontrol.de
- [41] www.naphthenics.cz
- [42] www.exxonmobil.com
- [43] www.sanimpex.com

Přílohy

Příloha 1 - Naměřené hodnoty permitivity a ztrátového činitele vysušených vzorků

Příloha 2 - Naměřené hodnoty permitivity a ztrátového činitele vlhkých vzorků

Příloha 3 - Grafické závislosti ztrátového činitele na teplotě při napětí 250, 500, 750 a 1000 V – vysušený stav

Příloha 4 - Grafické závislosti ztrátového činitele na teplotě při napětí 500 V – vlhký stav 1

Příloha 5 – Grafické závislosti ztrátového činitele na teplotě při napětí 500 V – vlhký stav 2

Příloha 6 - Porovnání měřících metod Scheringův můstek - Dielektrická spektroskopie při měření $\tan \delta$

Příloha 7 - Měřicí systém Scheringova můstku – měření ztrátového činitele a permitivity

Příloha 8 - Měřicí systém průrazného napětí

Příloha 9 - Měřicí systém Novocontrol – měření ztrátového činitele a permitivity

Příloha 1 - Naměřené hodnoty permitivity a ztrátového činitele vysušených vzorků

| název | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ε _r [-] | C ₄ [μF] | C _x [pF] | C ₀ [pF] |
|-------------------------------|--------|---------|----------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| řepkový olej TESCO | 23 | 250 | 0,01034 | 4,1010 | 0,40640 | 246,063 | 60 |
| | 23 | 500 | 0,01076 | 4,1008 | 0,40642 | 246,051 | 60 |
| | 23 | 750 | 0,01122 | 4,1006 | 0,40644 | 246,039 | 60 |
| | 23 | 1000 | 0,01162 | 4,1008 | 0,40642 | 246,051 | 60 |
| | 36 | 250 | 0,01912 | 3,6444 | 0,45732 | 218,665 | 60 |
| | 36 | 500 | 0,01993 | 3,6444 | 0,45732 | 218,665 | 60 |
| | 36 | 750 | 0,02047 | 3,6497 | 0,45666 | 218,981 | 60 |
| | 36 | 1000 | 0,02071 | 3,6564 | 0,45582 | 219,385 | 60 |
| | 52 | 250 | 0,03867 | 3,4177 | 0,48766 | 205,061 | 60 |
| | 52 | 500 | 0,03941 | 3,4212 | 0,48716 | 205,271 | 60 |
| | 52 | 750 | 0,03997 | 3,4249 | 0,48663 | 205,495 | 60 |
| | 52 | 1000 | 0,04077 | 3,4269 | 0,48635 | 205,613 | 60 |
| | 70 | 250 | 0,07404 | 3,1707 | 0,52564 | 190,244 | 60 |
| | 70 | 500 | 0,07354 | 3,1757 | 0,52482 | 190,542 | 60 |
| | 70 | 750 | 0,07337 | 3,1792 | 0,52424 | 190,752 | 60 |
| | 70 | 1000 | 0,07349 | 3,1828 | 0,52365 | 190,967 | 60 |
| 90 | 250 | 0,13388 | 2,9468 | 0,56558 | 176,810 | 60 | |
| 90 | 500 | 0,13565 | 2,9482 | 0,56532 | 176,891 | 60 | |
| 90 | 750 | 0,13488 | 2,9529 | 0,56442 | 177,173 | 60 | |
| 90 | 1000 | 0,13532 | 2,9554 | 0,56394 | 177,324 | 60 | |
| minerální olej SHELL DIALA DX | 26 | 250 | 0,00014 | 2,3290 | 0,71562 | 139,739 | 60 |
| | 26 | 500 | 0,00014 | 2,3299 | 0,71534 | 139,794 | 60 |
| | 26 | 750 | 0,00014 | 2,3305 | 0,71515 | 139,831 | 60 |
| | 26 | 1000 | 0,00014 | 2,3308 | 0,71507 | 139,846 | 60 |
| | 38 | 250 | 0,00022 | 2,3298 | 0,71538 | 139,786 | 60 |
| | 38 | 500 | 0,00023 | 2,3301 | 0,71527 | 139,807 | 60 |
| | 38 | 750 | 0,00024 | 2,3306 | 0,71513 | 139,835 | 60 |
| | 38 | 1000 | 0,00025 | 2,3318 | 0,71476 | 139,907 | 60 |
| | 49 | 250 | 0,00029 | 2,2995 | 0,72480 | 137,969 | 60 |
| | 49 | 500 | 0,00029 | 2,2990 | 0,72496 | 137,939 | 60 |
| | 49 | 750 | 0,00029 | 2,2989 | 0,72498 | 137,935 | 60 |
| | 49 | 1000 | 0,00029 | 2,2989 | 0,72499 | 137,933 | 60 |
| | 72 | 250 | 0,00094 | 2,2219 | 0,75010 | 133,316 | 60 |
| | 72 | 500 | 0,00095 | 2,2290 | 0,74772 | 133,740 | 60 |
| | 72 | 750 | 0,00096 | 2,2275 | 0,74822 | 133,651 | 60 |
| | 72 | 1000 | 0,00096 | 2,2267 | 0,74850 | 133,601 | 60 |
| 86 | 250 | 0,00126 | 2,1765 | 0,76575 | 130,591 | 60 | |
| 86 | 500 | 0,00126 | 2,1785 | 0,76506 | 130,709 | 60 | |
| 86 | 750 | 0,00127 | 2,1809 | 0,76420 | 130,856 | 60 | |
| 86 | 1000 | 0,00128 | 2,1825 | 0,76366 | 130,948 | 60 | |
| řepkový olej PREOL | 20 | 250 | 0,01125 | 3,4724 | 0,47998 | 208,342 | 60 |
| | 20 | 500 | 0,01147 | 3,4727 | 0,47994 | 208,359 | 60 |
| | 20 | 750 | 0,01176 | 3,4728 | 0,47992 | 208,368 | 60 |
| | 20 | 1000 | 0,01202 | 3,4735 | 0,47983 | 208,407 | 60 |
| | 41 | 250 | 0,02771 | 3,2753 | 0,50886 | 196,518 | 60 |
| | 41 | 500 | 0,02846 | 3,2761 | 0,50874 | 196,564 | 60 |
| | 41 | 750 | 0,02922 | 3,2771 | 0,50858 | 196,626 | 60 |
| | 41 | 1000 | 0,02975 | 3,2786 | 0,50834 | 196,719 | 60 |
| | 49 | 250 | 0,03947 | 3,2263 | 0,51658 | 193,581 | 60 |
| | 49 | 500 | 0,04013 | 3,2282 | 0,51628 | 193,693 | 60 |
| | 49 | 750 | 0,04031 | 3,2337 | 0,51541 | 194,020 | 60 |
| | 49 | 1000 | 0,04036 | 3,2380 | 0,51472 | 194,280 | 60 |
| | 65 | 250 | 0,06587 | 3,1140 | 0,53521 | 186,843 | 60 |
| | 65 | 500 | 0,06659 | 3,1303 | 0,53243 | 187,818 | 60 |
| | 65 | 750 | 0,06661 | 3,1325 | 0,53206 | 187,949 | 60 |
| | 65 | 1000 | 0,06678 | 3,1416 | 0,53052 | 188,494 | 60 |
| 82 | 250 | 0,11838 | 2,9840 | 0,55854 | 179,038 | 60 | |
| 82 | 500 | 0,11843 | 2,9951 | 0,55646 | 179,707 | 60 | |
| 82 | 750 | 0,11848 | 3,0072 | 0,55422 | 180,434 | 60 | |
| 82 | 1000 | 0,11853 | 3,0158 | 0,55264 | 180,950 | 60 | |

| název | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ε _r [-] | C ₄ [μF] | C _x [pF] | C ₀ [pF] |
|--------------------------------|--------|---------|----------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| slunečnicový olej PROMIENNA | 21 | 250 | 0,00150 | 3,1329 | 0,53198 | 187,977 | 60 |
| | 21 | 500 | 0,00149 | 3,1328 | 0,53200 | 187,970 | 60 |
| | 21 | 750 | 0,00152 | 3,1324 | 0,53207 | 187,945 | 60 |
| | 21 | 1000 | 0,00154 | 3,1323 | 0,53209 | 187,938 | 60 |
| | 34 | 250 | 0,00283 | 3,0772 | 0,54161 | 184,635 | 60 |
| | 34 | 500 | 0,00283 | 3,0774 | 0,54158 | 184,645 | 60 |
| | 34 | 750 | 0,00288 | 3,0775 | 0,54156 | 184,652 | 60 |
| | 34 | 1000 | 0,00292 | 3,0776 | 0,54155 | 184,655 | 60 |
| | 54 | 250 | 0,00636 | 2,9965 | 0,55621 | 179,788 | 60 |
| | 54 | 500 | 0,00645 | 2,9968 | 0,55614 | 179,811 | 60 |
| | 54 | 750 | 0,00653 | 2,9972 | 0,55608 | 179,830 | 60 |
| | 54 | 1000 | 0,00662 | 2,9977 | 0,55598 | 179,863 | 60 |
| | 73 | 250 | 0,01256 | 2,9235 | 0,57010 | 175,408 | 60 |
| | 73 | 500 | 0,01275 | 2,9253 | 0,56975 | 175,516 | 60 |
| | 73 | 750 | 0,01291 | 2,9262 | 0,56956 | 175,574 | 60 |
| | 73 | 1000 | 0,01307 | 2,9278 | 0,56925 | 175,670 | 60 |
| | 88 | 250 | 0,02200 | 2,8653 | 0,58168 | 171,916 | 60 |
| | 88 | 500 | 0,02219 | 2,8662 | 0,58149 | 171,972 | 60 |
| 88 | 750 | 0,02235 | 2,8672 | 0,58129 | 172,031 | 60 | |
| 88 | 1000 | 0,02241 | 2,8687 | 0,58098 | 172,123 | 60 | |
| Ester_v1 | 21 | 250 | 0,00091 | 3,5345 | 0,47154 | 212,071 | 60 |
| | 21 | 500 | 0,00091 | 3,5370 | 0,47121 | 212,220 | 60 |
| | 21 | 750 | 0,00091 | 3,5408 | 0,47070 | 212,450 | 60 |
| | 21 | 1000 | 0,00091 | 3,5457 | 0,47005 | 212,743 | 60 |
| | 36 | 250 | 0,00159 | 3,3765 | 0,49361 | 202,589 | 60 |
| | 36 | 500 | 0,00163 | 3,3779 | 0,49341 | 202,671 | 60 |
| | 36 | 750 | 0,00170 | 3,3803 | 0,49305 | 202,819 | 60 |
| | 36 | 1000 | 0,00178 | 3,3825 | 0,49273 | 202,951 | 60 |
| | 58 | 250 | 0,00383 | 3,3275 | 0,50087 | 199,653 | 60 |
| | 58 | 500 | 0,00411 | 3,3311 | 0,50034 | 199,864 | 60 |
| | 58 | 750 | 0,00436 | 3,3356 | 0,49966 | 200,136 | 60 |
| | 58 | 1000 | 0,00447 | 3,3388 | 0,49918 | 200,329 | 60 |
| | 78 | 250 | 0,00727 | 3,3195 | 0,50208 | 199,171 | 60 |
| | 78 | 500 | 0,00765 | 3,3329 | 0,50006 | 199,976 | 60 |
| | 78 | 750 | 0,00780 | 3,3454 | 0,49819 | 200,727 | 60 |
| | 78 | 1000 | 0,00793 | 3,3528 | 0,49709 | 201,171 | 60 |
| | 90 | 250 | 0,00961 | 3,3562 | 0,49660 | 201,369 | 60 |
| | 90 | 500 | 0,00999 | 3,3733 | 0,49408 | 202,396 | 60 |
| 90 | 750 | 0,01031 | 3,3827 | 0,49271 | 202,959 | 60 | |
| 90 | 1000 | 0,01055 | 3,3831 | 0,49264 | 202,988 | 60 | |
| Ester_v2 | 21 | 250 | 0,00107 | 2,6697 | 0,62428 | 160,185 | 60 |
| | 21 | 500 | 0,00105 | 2,6698 | 0,62427 | 160,187 | 60 |
| | 21 | 750 | 0,00107 | 2,6698 | 0,62426 | 160,190 | 60 |
| | 21 | 1000 | 0,00106 | 2,6698 | 0,62426 | 160,190 | 60 |
| | 36 | 250 | 0,00257 | 2,6347 | 0,63259 | 158,080 | 60 |
| | 36 | 500 | 0,00256 | 2,6344 | 0,63265 | 158,065 | 60 |
| | 36 | 750 | 0,00263 | 2,6343 | 0,63267 | 158,060 | 60 |
| | 36 | 1000 | 0,00267 | 2,6343 | 0,63269 | 158,055 | 60 |
| | 56 | 250 | 0,00586 | 2,5851 | 0,64472 | 155,106 | 60 |
| | 56 | 500 | 0,00594 | 2,5852 | 0,64469 | 155,113 | 60 |
| | 56 | 750 | 0,00605 | 2,5853 | 0,64466 | 155,121 | 60 |
| | 56 | 1000 | 0,00612 | 2,5854 | 0,64464 | 155,125 | 60 |
| | 73 | 250 | 0,00874 | 2,5513 | 0,65327 | 153,076 | 60 |
| | 73 | 500 | 0,00893 | 2,5509 | 0,65336 | 153,055 | 60 |
| | 73 | 750 | 0,00908 | 2,5509 | 0,65337 | 153,053 | 60 |
| | 73 | 1000 | 0,00919 | 2,5511 | 0,65331 | 153,067 | 60 |
| | 88 | 250 | 0,01268 | 2,5158 | 0,66248 | 150,948 | 60 |
| | 88 | 500 | 0,01316 | 2,5150 | 0,66269 | 150,900 | 60 |
| 88 | 750 | 0,01342 | 2,5151 | 0,66266 | 150,907 | 60 | |
| 88 | 1000 | 0,01364 | 2,5152 | 0,66265 | 150,909 | 60 | |

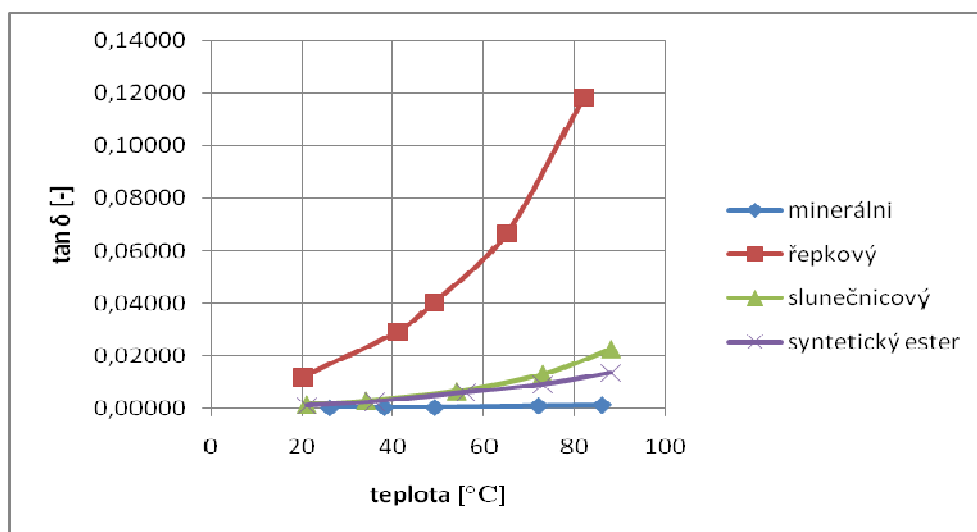
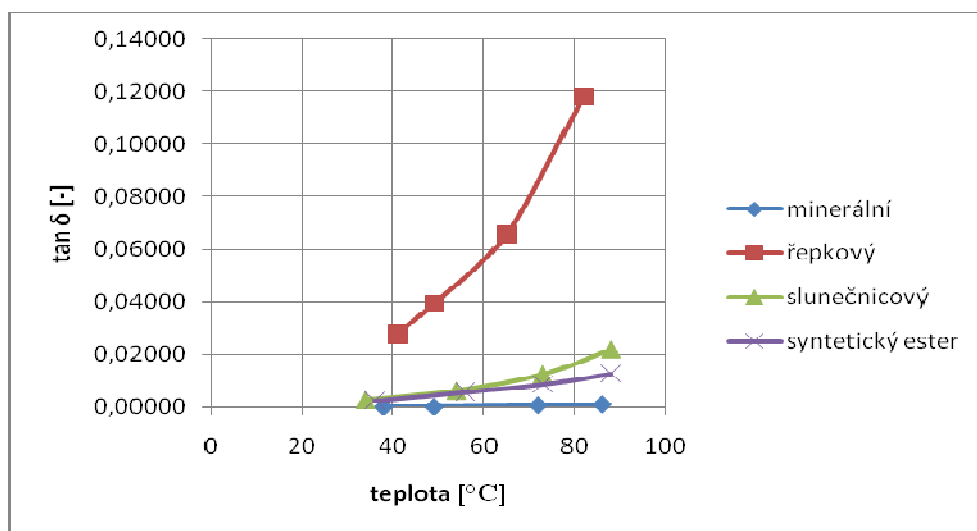
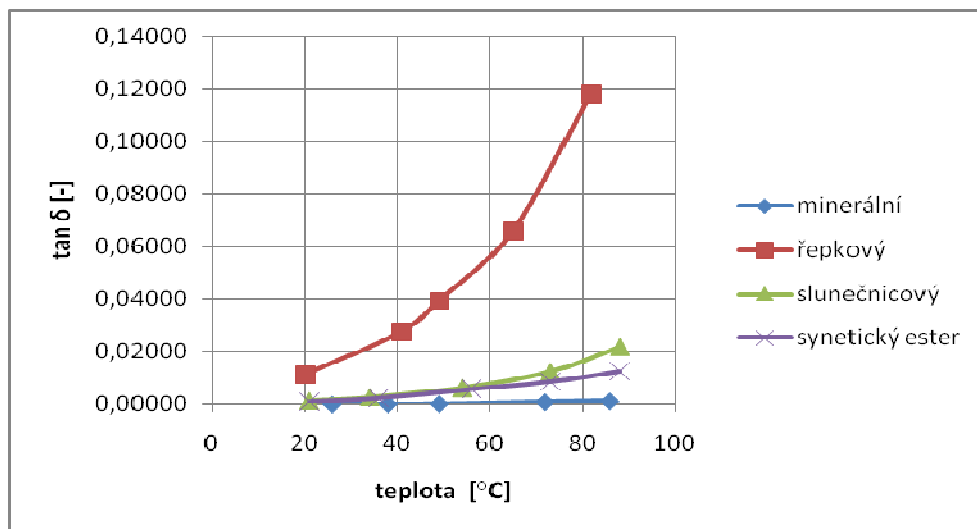
| název | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ϵ_r [-] | C_4 [μF] | C_x [pF] | C_o [pF] |
|----------|--------|-------|----------|------------------|------------|------------|------------|
| Ester_v3 | 19 | 250 | 0,00006 | 2,1952 | 0,75922 | 131,714 | 60 |
| | 19 | 500 | 0,00006 | 2,1954 | 0,75916 | 131,725 | 60 |
| | 19 | 750 | 0,00006 | 2,1955 | 0,75913 | 131,730 | 60 |
| | 19 | 1000 | 0,00005 | 2,1955 | 0,75913 | 131,730 | 60 |
| | 32 | 250 | 0,00015 | 2,1743 | 0,76652 | 130,460 | 60 |
| | 32 | 500 | 0,00010 | 2,1764 | 0,76578 | 130,586 | 60 |
| | 32 | 750 | 0,00012 | 2,1774 | 0,76545 | 130,642 | 60 |
| | 32 | 1000 | 0,00011 | 2,1782 | 0,76516 | 130,692 | 60 |
| | 50 | 250 | 0,00023 | 2,1934 | 0,75984 | 131,607 | 60 |
| | 50 | 500 | 0,00023 | 2,1967 | 0,75872 | 131,801 | 60 |
| | 50 | 750 | 0,00023 | 2,1998 | 0,75763 | 131,991 | 60 |
| | 50 | 1000 | 0,00022 | 2,2032 | 0,75649 | 132,189 | 60 |
| | 70 | 250 | 0,00028 | 2,1818 | 0,7639 | 130,907 | 60 |
| | 70 | 500 | 0,00026 | 2,1822 | 0,76376 | 130,931 | 60 |
| | 70 | 750 | 0,00027 | 2,1824 | 0,76368 | 130,945 | 60 |
| | 70 | 1000 | 0,00029 | 2,1827 | 0,76357 | 130,964 | 60 |
| | 88 | 250 | 0,00040 | 2,1479 | 0,77595 | 128,874 | 60 |
| | 88 | 500 | 0,00044 | 2,1515 | 0,77466 | 129,089 | 60 |
| | 88 | 750 | 0,00047 | 2,1549 | 0,77343 | 129,294 | 60 |
| | 88 | 1000 | 0,00056 | 2,1572 | 0,77262 | 129,430 | 60 |

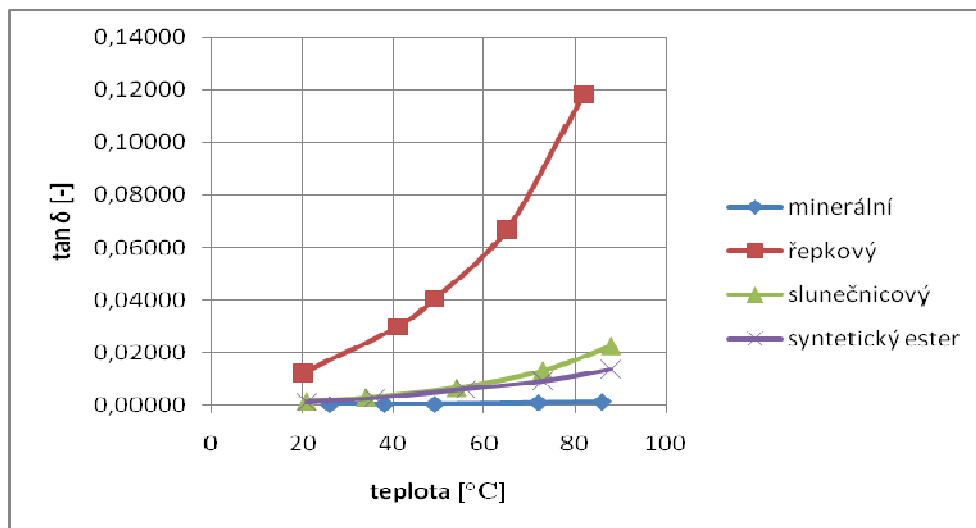
Příloha 2 - Naměřené hodnoty permitivity a ztrátového činitele vlhkých vzorků

| název | sušení | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ϵ_r [-] | C_4 [µF] | C_x [pF] | C_0 [pF] |
|---------|---------|--------|---------|-----------|------------------|------------|------------|------------|
| Ester | 3 hod | 37 | 250 | 0,00204 | 2,9698795 | 0,56119 | 178,19277 | 60 |
| | 3 hod | 37 | 500 | 0,00164 | 2,9705676 | 0,56106 | 178,23406 | 60 |
| | 3 hod | 37 | 750 | 0,00157 | 2,9716269 | 0,56086 | 178,29761 | 60 |
| | 3 hod | 37 | 1000 | 0,00146 | 2,9721038 | 0,56077 | 178,32623 | 60 |
| | 3 hod | 46 | 250 | 0,00188 | 2,952413 | 0,56451 | 177,14478 | 60 |
| | 3 hod | 46 | 500 | 0,00185 | 2,9523607 | 0,56452 | 177,14164 | 60 |
| | 3 hod | 46 | 750 | 0,00181 | 2,9522038 | 0,56455 | 177,13223 | 60 |
| | 3 hod | 46 | 1000 | 0,00176 | 2,9518378 | 0,56462 | 177,11027 | 60 |
| | 3 hod | 55 | 250 | 0,00249 | 2,9251569 | 0,56977 | 175,50942 | 60 |
| | 3 hod | 55 | 500 | 0,00243 | 2,9251569 | 0,56977 | 175,50942 | 60 |
| | 3 hod | 55 | 750 | 0,00239 | 2,9253623 | 0,56973 | 175,52174 | 60 |
| | 3 hod | 55 | 1000 | 0,00236 | 2,9254137 | 0,56972 | 175,52482 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 250 | 0,00337 | 2,8902068 | 0,57666 | 173,41241 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 500 | 0,00334 | 2,8902569 | 0,57665 | 173,41542 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 750 | 0,0033 | 2,8905577 | 0,57659 | 173,43346 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 1000 | 0,00328 | 2,8902569 | 0,57665 | 173,41542 | 60 |
| | 3 hod | 76 | 250 | 0,00517 | 2,8435588 | 0,58612 | 170,61353 | 60 |
| | 3 hod | 76 | 500 | 0,00506 | 2,8438014 | 0,58607 | 170,62808 | 60 |
| | 3 hod | 76 | 750 | 0,00497 | 2,8446265 | 0,5859 | 170,67759 | 60 |
| | 3 hod | 76 | 1000 | 0,0049 | 2,8451121 | 0,5858 | 170,70673 | 60 |
| 3 hod | 90 | 250 | 0,00853 | 2,7796772 | 0,59959 | 166,78063 | 60 | |
| 3 hod | 90 | 500 | 0,00853 | 2,7795382 | 0,59962 | 166,77229 | 60 | |
| 3 hod | 90 | 750 | 0,00852 | 2,7795382 | 0,59962 | 166,77229 | 60 | |
| 3 hod | 90 | 1000 | 0,00848 | 2,7796772 | 0,59959 | 166,78063 | 60 | |
| Ester | 5,5 hod | 35 | 250 | 0,00346 | 2,894423 | 0,57582 | 173,66538 | 60 |
| | 5,5 hod | 35 | 500 | 0,00362 | 2,8943225 | 0,57584 | 173,65935 | 60 |
| | 5,5 hod | 35 | 750 | 0,00368 | 2,8935688 | 0,57599 | 173,61413 | 60 |
| | 5,5 hod | 35 | 1000 | 0,00373 | 2,8922632 | 0,57625 | 173,53579 | 60 |
| | 5,5 hod | 45 | 250 | 0,00473 | 2,8714344 | 0,58043 | 172,28606 | 60 |
| | 5,5 hod | 45 | 500 | 0,0048 | 2,8709892 | 0,58052 | 172,25935 | 60 |
| | 5,5 hod | 45 | 750 | 0,00483 | 2,8705442 | 0,58061 | 172,23265 | 60 |
| | 5,5 hod | 45 | 1000 | 0,00483 | 2,8700499 | 0,58071 | 172,20299 | 60 |
| | 5,5 hod | 57 | 250 | 0,00667 | 2,8562778 | 0,58351 | 171,37667 | 60 |
| | 5,5 hod | 57 | 500 | 0,00672 | 2,8552991 | 0,58371 | 171,31795 | 60 |
| | 5,5 hod | 57 | 750 | 0,00671 | 2,8541256 | 0,58395 | 171,24754 | 60 |
| | 5,5 hod | 57 | 1000 | 0,00673 | 2,8531973 | 0,58414 | 171,19184 | 60 |
| | 5,5 hod | 69 | 250 | 0,01028 | 2,8483699 | 0,58513 | 170,90219 | 60 |
| | 5,5 hod | 69 | 500 | 0,01047 | 2,848662 | 0,58507 | 170,91972 | 60 |
| | 5,5 hod | 69 | 750 | 0,01102 | 2,848662 | 0,58507 | 170,91972 | 60 |
| | 5,5 hod | 69 | 1000 | 0,01133 | 2,8500259 | 0,58479 | 171,00156 | 60 |
| | 5,5 hod | 76 | 250 | 0,01433 | 2,8239972 | 0,59018 | 169,43983 | 60 |
| | 5,5 hod | 76 | 500 | 0,01431 | 2,8218934 | 0,59062 | 169,3136 | 60 |
| | 5,5 hod | 76 | 750 | 0,01432 | 2,8214157 | 0,59072 | 169,28494 | 60 |
| | 5,5 hod | 76 | 1000 | 0,01445 | 2,8207472 | 0,59086 | 169,24483 | 60 |
| 5,5 hod | 90 | 250 | 0,01924 | 2,7455632 | 0,60704 | 164,73379 | 60 | |
| 5,5 hod | 90 | 500 | 0,01973 | 2,7438907 | 0,60741 | 164,63344 | 60 | |
| 5,5 hod | 90 | 750 | 0,01992 | 2,7413633 | 0,60797 | 164,4818 | 60 | |
| 5,5 hod | 90 | 1000 | 0,01999 | 2,7392007 | 0,60845 | 164,35204 | 60 | |

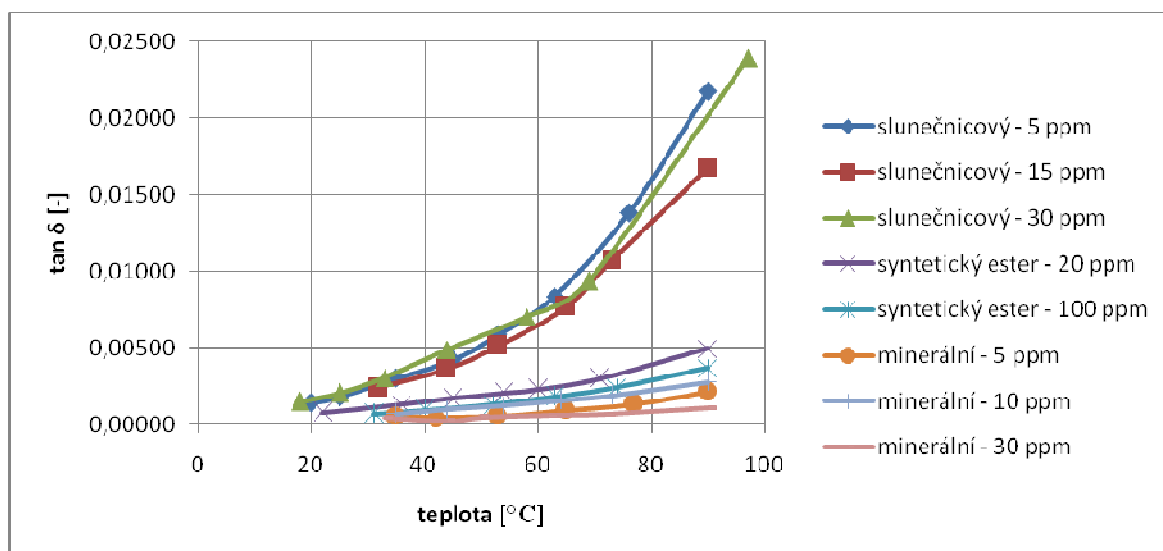
| název | sušení | T [°C] | U [V] | tg δ [-] | ε _r [-] | C ₄ [μF] | C _x [pF] | C ₀ [pF] |
|-------------------|---------|--------|---------|----------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| slunečnicový olej | 3 hod | 36 | 250 | 0,00327 | 3,102565 | 0,53719 | 186,1539 | 60 |
| | 3 hod | 36 | 500 | 0,00325 | 3,100429 | 0,53756 | 186,0257 | 60 |
| | 3 hod | 36 | 750 | 0,00328 | 3,098239 | 0,53794 | 185,8943 | 60 |
| | 3 hod | 36 | 1000 | 0,00332 | 3,096224 | 0,53829 | 185,7735 | 60 |
| | 3 hod | 45 | 250 | 0,00433 | 3,077529 | 0,54156 | 184,6517 | 60 |
| | 3 hod | 45 | 500 | 0,00429 | 3,077359 | 0,54159 | 184,6415 | 60 |
| | 3 hod | 45 | 750 | 0,00424 | 3,077245 | 0,54161 | 184,6347 | 60 |
| | 3 hod | 45 | 1000 | 0,00421 | 3,077245 | 0,54161 | 184,6347 | 60 |
| | 3 hod | 54 | 250 | 0,00642 | 3,036265 | 0,54892 | 182,1759 | 60 |
| | 3 hod | 54 | 500 | 0,00626 | 3,03632 | 0,54891 | 182,1792 | 60 |
| | 3 hod | 54 | 750 | 0,00617 | 3,036486 | 0,54888 | 182,1892 | 60 |
| | 3 hod | 54 | 1000 | 0,00616 | 3,036542 | 0,54887 | 182,1925 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 250 | 0,00849 | 2,999922 | 0,55557 | 179,9953 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 500 | 0,00845 | 2,999814 | 0,55559 | 179,9888 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 750 | 0,00842 | 2,999274 | 0,55569 | 179,9565 | 60 |
| | 3 hod | 64 | 1000 | 0,0084 | 2,999004 | 0,55574 | 179,9403 | 60 |
| | 3 hod | 75 | 250 | 0,01342 | 2,948757 | 0,56521 | 176,9254 | 60 |
| | 3 hod | 75 | 500 | 0,01333 | 2,948913 | 0,56518 | 176,9348 | 60 |
| | 3 hod | 75 | 750 | 0,01345 | 2,949487 | 0,56507 | 176,9692 | 60 |
| | 3 hod | 75 | 1000 | 0,01388 | 2,948861 | 0,56519 | 176,9317 | 60 |
| 3 hod | 90 | 250 | 0,02153 | 2,901376 | 0,57444 | 174,0826 | 60 | |
| 3 hod | 90 | 500 | 0,02158 | 2,900669 | 0,57458 | 174,0402 | 60 | |
| 3 hod | 90 | 750 | 0,02174 | 2,90077 | 0,57456 | 174,0462 | 60 | |
| 3 hod | 90 | 1000 | 0,02191 | 2,900215 | 0,57467 | 174,0129 | 60 | |
| slunečnicový olej | 5,5 hod | 35 | 250 | 0,00274 | 3,121216 | 0,53398 | 187,2729 | 60 |
| | 5,5 hod | 35 | 500 | 0,00277 | 3,123555 | 0,53358 | 187,4133 | 60 |
| | 5,5 hod | 35 | 750 | 0,00278 | 3,122151 | 0,53382 | 187,3291 | 60 |
| | 5,5 hod | 35 | 1000 | 0,00282 | 3,120047 | 0,53418 | 187,2028 | 60 |
| | 5,5 hod | 44 | 250 | 0,00385 | 3,085677 | 0,54013 | 185,1406 | 60 |
| | 5,5 hod | 44 | 500 | 0,00392 | 3,085163 | 0,54022 | 185,1098 | 60 |
| | 5,5 hod | 44 | 750 | 0,00395 | 3,084421 | 0,54035 | 185,0652 | 60 |
| | 5,5 hod | 44 | 1000 | 0,00397 | 3,08385 | 0,54045 | 185,031 | 60 |
| | 5,5 hod | 54 | 250 | 0,00571 | 3,042695 | 0,54776 | 182,5617 | 60 |
| | 5,5 hod | 54 | 500 | 0,00571 | 3,042528 | 0,54779 | 182,5517 | 60 |
| | 5,5 hod | 54 | 750 | 0,00569 | 3,042195 | 0,54785 | 182,5317 | 60 |
| | 5,5 hod | 54 | 1000 | 0,00563 | 3,042029 | 0,54788 | 182,5217 | 60 |
| | 5,5 hod | 65 | 250 | 0,00812 | 2,999706 | 0,55561 | 179,9824 | 60 |
| | 5,5 hod | 65 | 500 | 0,00811 | 2,999652 | 0,55562 | 179,9791 | 60 |
| | 5,5 hod | 65 | 750 | 0,0081 | 2,999544 | 0,55564 | 179,9726 | 60 |
| | 5,5 hod | 65 | 1000 | 0,00807 | 2,999328 | 0,55568 | 179,9597 | 60 |
| | 5,5 hod | 73 | 250 | 0,01117 | 2,964491 | 0,56221 | 177,8695 | 60 |
| | 5,5 hod | 73 | 500 | 0,01134 | 2,96428 | 0,56225 | 177,8568 | 60 |
| | 5,5 hod | 73 | 750 | 0,01146 | 2,964175 | 0,56227 | 177,8505 | 60 |
| | 5,5 hod | 73 | 1000 | 0,01149 | 2,964122 | 0,56228 | 177,8473 | 60 |
| 5,5 hod | 88 | 250 | 0,01715 | 2,920032 | 0,57077 | 175,2019 | 60 | |
| 5,5 hod | 88 | 500 | 0,01736 | 2,919316 | 0,57091 | 175,159 | 60 | |
| 5,5 hod | 88 | 750 | 0,01752 | 2,917987 | 0,57117 | 175,0792 | 60 | |
| 5,5 hod | 88 | 1000 | 0,0177 | 2,917476 | 0,57127 | 175,0486 | 60 | |

Příloha 3 - Grafické závislosti ztrátového činitele na teplotě při napětí 250, 500, 750 a 1000 V – vysušený stav

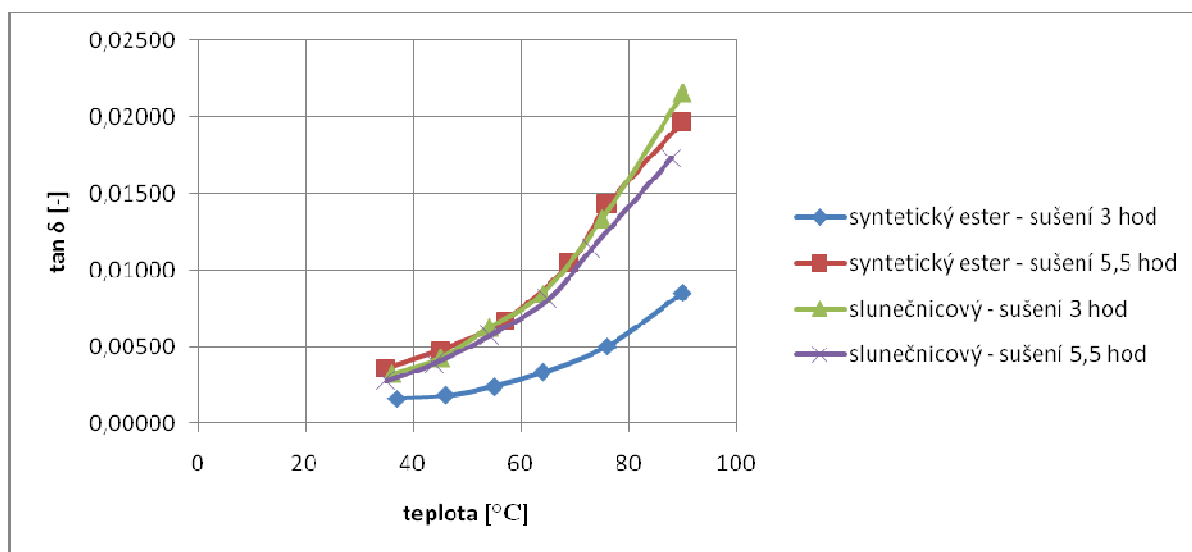




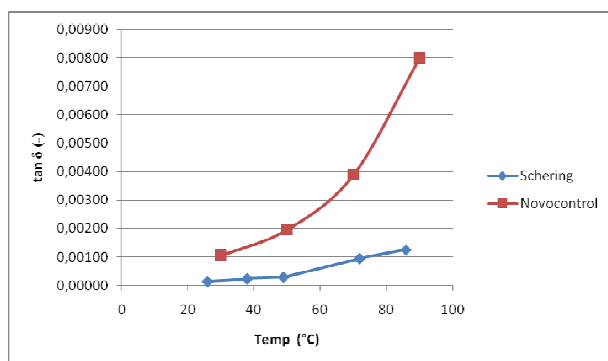
Příloha 4 - Grafické závislosti ztrátového činitele na teplotě při napětí 500 V – vlhký stav 1



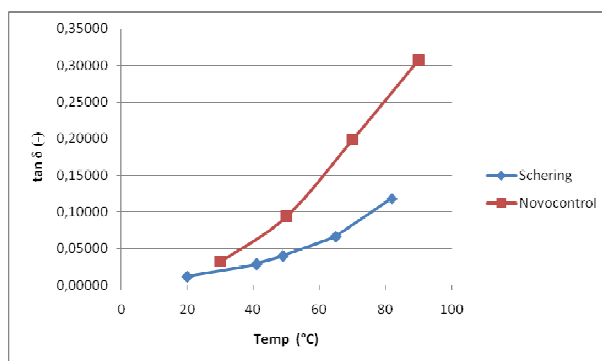
Příloha 5 – Grafické závislosti ztrátového činitele na teplotě při napětí 500 V – vlhký stav 2



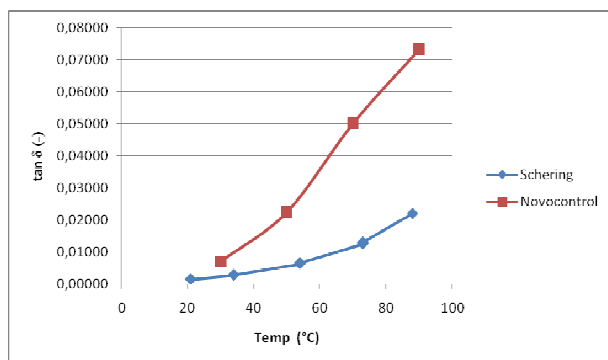
Příloha 6 - Porovnání měřících metod Scheringův můstek - Dielektrická spektroskopie při měření $\tan \delta$



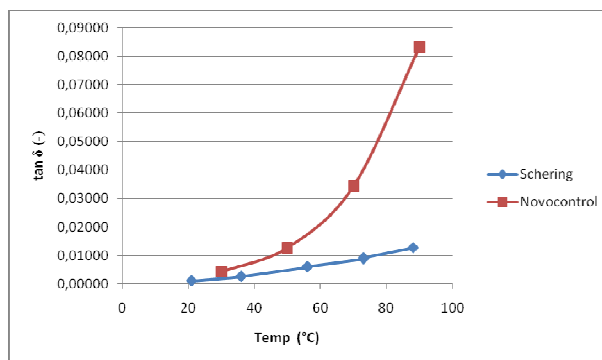
minerální olej SHELL DIALA DX



řepkový olej PREOL



slunečnicový olej PROMIENNA



syntetický ester

Příloha 7 - Měřicí systém Scheringova můstku – měření ztrátového činitele a permitivity



Příloha 8 - Měřicí systém průrazného napětí



Příloha 9 - Měřicí systém Novocontrol – měření ztrátového činitele a permitivity

