



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ VYSOKONAPĚŤOVÝCH KOMPONENTŮ POMOCÍ ELEKTRONICKÉHO MŮSTKU

MEASUREMENT OF HV EQUIPMENTS BY ELECTRONIC BRIDGE.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivan Kumičák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Ivan Kumičák

ID: 164755

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měření elektrických parametrů vysokonapěťových komponentů pomocí elektronického můstku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše literatury, požadavky na zkoušky vyplývající z platných norem, články IEEE, Scopus, WoS
2. Seznámení se s principem funkce a eliminací vnějších vlivů u můstkových měření na systému Tettex 2840
3. Seznámení se s měřením na systému Tettex 2830/2831 s využitím měřicích buněk pro pevná a kapalná dielektrika
4. Praktická laboratorní měření
5. Zpracování naměřených dat, porovnání dílčích výsledků

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

KUMIČÁK, I. *Měření elektrických parametrů vysokonapěťových komponentů pomocí elektronického můstku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 90s. Vedoucí semestrální práce Ing. Michal Krbal, Ph.D..

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření elektrických parametrů vysokonapěťových komponentů pomocí elektronického můstku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 22.5.2019

.....

ABSTRAKT

Hlavním tématem této diplomové práce je měření dielektrických materiálů na měřicím zařízení Tettex. Práce pojednává o základní fyzice dielektrik, co to dielektrikum je, jak se chová v elektrických polích a co ovlivňuje jeho parametry. V textu jsou popsány metody měření vybraných parametrů dielektrik, a měřicí zařízení Tettex a, jejich funkční principy. Dále jsou v práci zhodnocené provedené měření a diskutovány získané výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA: dielektrika; dipól; mechanismy polarizace; relativní permitivita; ztrátový činitel; izolační odpor; rezistivita; Tettex; PVC; PE; minerální olej; silikonový olej; esterový olej

ABSTRACT

The main idea of this thesis is measurements of dielectric materials by using a device Tettex. The thesis is about basic physic properties of dielectric materials. The determination of a dielectric material is considered. The behavior of these materials in electrical fields and reasons, those can have an influence on it, are considered as well. In the text are described measuring methods of chosen parameters of dielectric materials by device Tettex and its functional principles. There are an evaluation of measurements, which were done, and a discussion about achieved results.

KEY WORDS: dielectrics; dipole; polarization mechanisms; relative permmissivity; loss factor; insulation resistance; resistivity; Tettex; PVC; PE; mineral oil; silicone oil; ester oil

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	12
2 DIELEKTRIKA OBECNĚ	13
2.1 INTERAKCE DIELEKTRIK S ELEKTRICKÝM POLEM	14
2.1.1 MAKROSKOPICKÉ HLEDISKO	14
2.1.2 MIKROSKOPICKÉ HLEDISKO.....	14
2.1.3 LOKÁLNÍ POLE V DIELEKTRIKU	15
2.2 MECHANIZMY POLARIZACE	15
2.2.1 DEFORMAČNÍ POLARIZACE	16
2.2.2 RELAXAČNÍ POLARIZACE.....	17
2.2.3 MIGRAČNÍ POLARIZACE	18
2.3 ELEKTRICKÁ VODIVOST DIELEKTRIK	19
2.3.1 ELEKTRICKÁ VODIVOST PEVNÝCH DIELEKTRIK	19
2.3.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST KAPALNÝCH DIELEKTRIK.....	21
2.3.3 ELEKTRICKÁ VODIVOST PLYNNÝCH DIELEKTRIK	22
2.4 DIELEKTRIKUM V ELEKTROSTATICKÉM POLI.....	22
2.5 DIELEKTRIKUM VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI	23
2.6 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	24
2.6.1 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY V PEVNÝCH DIELEKTRIKÁCH.....	25
2.6.2 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY V KAPALNÝCH DIELEKTRIKÁCH	27
2.6.3 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY V PLYNNÝCH DIELEKTRIKÁCH	27
2.7 SLEDOVANÉ PARAMETRY DIELEKTRIK	27
2.7.1 IZOLAČNÍ ODPOR.....	28
2.7.2 RELATIVNÍ PERMITIVITA.....	28
2.7.3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL.....	29
2.8 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ DIELEKTRICKÉ PARAMETRY	31
2.8.1 TEPLOTA	31
2.8.2 VLHKOST	31
2.8.3 SVĚTLO	32
2.8.4 NAPĚTÍ	32
2.8.5 FREKVENCE.....	32
2.8.6 ČAS	32
3 MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ	33
3.1 FUNKČNÍ PRINCIPY ZAŘÍZENÍ TETTEX	33
3.1.1 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE.....	33
3.1.2 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU	34
3.1.3 MĚŘENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY	35
3.2 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ TETTEX	35

3.2.1 TETTEX 2830/2831, TETTEX 2840	35
3.2.2 TETTEX 2914.....	35
3.2.3 TETTEX 2903.....	36
3.3 PŘÍPRAVA VZORKŮ	37
3.3.1 PEVNÁ DIELEKTRIKA	37
3.3.2 KAPALNÁ DIELEKTRIKA.....	37
3.4 KONDICIONOVÁNÍ.....	38
3.5 METODIKA MĚŘENÍ	38
3.5.1 PEVNÁ DIELEKTRIKA	38
3.5.2 KAPALNÁ DIELEKTRIKA.....	39
3.6 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	40
4 DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY	41
4.1 PLYNNÁ DIELEKTRIKA.....	41
4.1.1 OXID UHLÍČITÝ CO ₂	41
4.1.2 VZDUCH.....	41
4.1.3 HEXAFLUORID SÍRY SF ₆	41
4.1.4 DUSÍK N ₂	42
4.2 KAPALNÁ DIELEKTRIKA	42
4.2.1 MINERÁLNÍ OLEJE.....	42
4.2.2 SYNTETICKÉ OLEJE	46
4.2.3 ESTERY	48
4.3 PEVNÁ DIELEKTRIKA	51
4.3.1 KERAMIKA	51
4.3.2 SKLO	53
4.3.3 PAPÍR.....	54
4.3.4 POLYPROPYLEN – PP	54
4.3.5 POLYETYLEN – PE	55
4.3.6 ZESÍŤOVANÝ POLYETYLEN – XLPE	56
4.3.7 POLYVINYLCHLORID – PVC	57
5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	59
5.1 VZORKY	59
5.2 PRACOVISTĚ	62
5.3 POSTUPY MĚŘENÍ.....	65
5.4 ZPRACOVANÉ VÝSLEDKY	66
5.4.1 MĚŘENÍ POLYETYLENŮ.....	66
5.4.2 MĚŘENÍ POLYVINYLCHLORIDŮ.....	68
5.4.3 MĚŘENÍ PAPÍRŮ.....	69
5.4.4 MĚŘENÍ OLEJŮ	70
6 ZÁVĚR.....	77
POUŽITÁ LITERATURA	80
PŘÍLOHY	84

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1: Elektronová polarizace [14].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2.2: Iontová polarizace [14].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2.3: Dipólová relaxační polarizace [14]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.4: Rozložení prostorového náboje [14]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.5: Rozdíl mezi extrémě čistým a technicky čistým kapalným dielektrikem [1]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2.6: Závislost relativní permitivity na teplotě [1]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2.7: Závislost relativní permitivity na teplotě pro kapalná dielektrika [1]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2.8: Příspěvky jednotlivých polarizací k relativní permitivitě v závislosti na frekvenci[1]...24</i>	
<i>Obr. 2.9: Závislost ztrátového činitele na koncentraci Na₂O [5] - upraveno.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2.10: Rozdíl mezi dobře vypáleným a špatně vypáleným korundem [5] - upraveno</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2.11: Teplotní závislost ztrátového činitele vysušeného papíru pro různé frekvence [5].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2.12: Činitel dielektrických ztrát [6]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2.13: Sériový náhradní obvod [6].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2.14: Paralelní náhradní obvod [6].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2.15: Závislost tg δ na frekvenci pro sériový a paralelní náhradní obvod [1].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.1: Schéma zapojení Scheringova můstku [10]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3.2: Princip měření izolačního odporu [11].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3.3: Buňka pro pevná dielektrika [12].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3.4: Buňka pro kapalná dielektrika [13]</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.1: Závislost elektrické pevnosti na obsahu vody v oleji [8] - upraveno</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4.2: Závislost relativní permitivity na frekvenci přiloženého napětí pro velikost mezery 0,6 mm [18].....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4.3: Závislost ztrátového činitele na frekvenci [19] - upraveno.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4.4: Závislost frekvence na relativní permitivitě [19] - upraveno.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4.5: Závislost relativní permitivity na obsahu vody v silikonovém oleji [24] - upraveno</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4.6: Závislost ztrátového činitele na obsahu vody v silikonovém oleji [24] – upraveno.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4.7: Závislost ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty silikonového oleje [25] - upraveno.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4.8: Závislost relativní permitivity na teplotě pro různé přírodní estery [29] - upraveno</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4.9: Závislost ztrátového činitele na teplotě pro různé přírodní estery [29] - upraveno</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4.10: Závislost relativní permitivity syntetického esteru na frekvenci [30].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4.11: Závislost ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty syntetického esteru [30]</i>	<i>51</i>

<i>Obr. 4.12: Závislost relativní permitivity porcelánu na teplotě [32] - upraveno</i>	52
<i>Obr. 4.13: Závislost ztrátového činitele na teplotě pro různá komerčně dostupná skla [34] - upraveno</i>	53
<i>Obr. 4.14: Závislost relativní permitivity a ztrátového činitele na teplotě pro různý obsah přidaných látek [35] - upraveno</i>	55
<i>Obr. 4.15: Granulát používaný na výrobu polyetylenových izolací</i>	56
<i>Obr. 4.16: Granulát pro výrobu XLPE izolací</i>	57
<i>Obr. 4.17: Granulát používaný pro výrobu PVC izolací</i>	57
<i>Obr. 5.1: Vzorky polyetylénu</i>	59
<i>Obr. 5.2: Tloušťka vzorku spolu s procentní odchylkou</i>	60
<i>Obr. 5.3: Vzorky polyvinylchloridů</i>	60
<i>Obr. 5.4: Vzorky papírů</i>	60
<i>Obr. 5.5: Vzorek minerálního oleje</i>	61
<i>Obr. 5.6: Vzorek silikonového oleje</i>	62
<i>Obr. 5.7: Vzorek esterového oleje</i>	62
<i>Obr. 5.8: Zapojení soustavy pro měření pevných dielektrik</i>	63
<i>Obr. 5.9: Detail buňky 2914</i>	63
<i>Obr. 5.10: Zapojení aparatury pro měření kapalných dielektrik</i>	64
<i>Obr. 5.11: Závislost ztrátového činitele polyetylénu na teplotě</i>	66
<i>Obr. 5.12: Zvýrazněná oblast grafu na obrázku 5.11</i>	67
<i>Obr. 5.13: Závislost relativní permitivity polyetylénu na teplotě</i>	68
<i>Obr. 5.14: Závislost ztrátového činitele minerálního oleje na přiloženém napětí</i>	71
<i>Obr. 5.15: Průběh proudu měřeným vzorkem</i>	71
<i>Obr. 5.16: Vliv teploty na polarizační děje v silikonovém olej</i>	72
<i>Obr. 5.17: Závislost ztrátového činitele na teplotě pro esterový olej</i>	73
<i>Obr. 5.18: Porovnání mnou změřených dat s daty z publikace [30]</i>	74
<i>Obr. 5.19: Závislost relativní permitivity na teplotě pro esterový olej</i>	74
<i>Obr. 5.20: Průběh polarizačních dějů v různých kapalných dielektrikách</i>	75
<i>Obr. 5.21: Vliv změny frekvence na ztrátový činitel testovaných olejů</i>	76
<i>Obr. 6.1: Otvor pro aplikaci oleje do buňky</i>	79

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1: Vodivost materiálů [1]</i>	13
<i>Tab. 2.2 Závislost vodivosti transformátorového oleje na teplotě [5]</i>	21
<i>Tab. 2.3: Měrný objemový odpor některých elektrotechnických dielektrik [8;9]</i>	28
<i>Tab. 2.4: Relativní permitivita některých elektrotechnických dielektrik [7;8;9]</i>	29
<i>Tab. 2.5: Ztrátový činitel pro některá elektrotechnická dielektrika [8;9]</i>	31
<i>Tab. 3.1: Technická data Tettex 2830/2831 a Tettex 2840[11]</i>	35
<i>Tab. 3.2: Vybrané technické parametry buňky pro pevná dielektrika[12]</i>	36
<i>Tab. 3.3: Vybrané technické parametry buňky pro kapalná dielektrika[13]</i>	36
<i>Tab. 4.1: Limitní hodnoty vybraných parametrů minerálních olejů [44]</i>	44
<i>Tab. 5.1: Podmínky měření polyetylénu</i>	66
<i>Tab. 5.2: Podmínky měření polyvinylchloridů</i>	68
<i>Tab. 5.3: Zpracovaná data z měření PVC</i>	69
<i>Tab. 5.4: Podmínky měření papírů</i>	69
<i>Tab. 5.5: Zpracovaná data z měření papírů</i>	70
<i>Tab. 5.6: Podmínky měření minerálního oleje</i>	70
<i>Tab. 5.7: Podmínky měření silikonového oleje</i>	72
<i>Tab. 5.8: Podmínky měření esterového oleje</i>	73
<i>Tab. 5.9: Podmínky měření rezistivity olejů</i>	75
<i>Tab. 5.10: Podmínky měření frekvenční závislosti</i>	76

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
α	polarizovatelnost	Cm^2/V
γ	vodivost	S/m
δ	ztrátový úhel	rad
ε_0	relativní permitivita vakua	-
ε_r	relativní permitivita	-
ϑ	teplota	$^{\circ}\text{C}$
η	dynamická viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ	rezistivita	Ωm
τ	časová konstanta	s
f	frekvence	Hz
h	tloušťka	mm
$\text{tg } \delta$	ztrátový činitel	-
q	náboj	C
C	kapacita	F
D	elektrická indukce	C/m^2
E	intenzita elektrického pole	V/m
E_l	intenzita lokálního elektrického pole	V/m
I	proud	A
P	výkon	W
R	odpor	Ω
U	napětí	V

Zkratka

Název

ČSN	Česká státní norma
IEC	mezinárodní technická norma
PE	polyetylén
PNE	podniková norma energetiky
PP	polypropylén
PVC	polyvinylchlorid
XLPE	zesíťovaný polyetylén

1 ÚVOD

Izolační materiály jsou velmi důležitým aspektem elektrotechniky. Když se na elektrotechnické zařízení podíváme jako na soubor sériových elementů, tak izolační podsystém je nejslabším místem tohoto řetězce. Izolační materiál zařízení určuje, jakou spolehlivost potažmo životnost bude dané zařízení mít. Proto je nezbytně nutné znát vlastnosti použitých izolačních materiálů v daném zařízení, abychom uměli určit, za jakých podmínek, a v jakých podmínkách lze dané zařízení používat.

Dielektrické materiály lze nalézt úplně všude, kde se vyskytuje elektrické napětí. Ať už to jsou podpěrky v rozvodných stanicích, závěsné izolátory na vedeních nebo izolace vysokonapěťových kabelů. Z dielektrických materiálů se také vyrábí ochranné pomůcky pro elektroenergetiku, mezi které patří například ochranné rukavice, různé izolační tyče apod.

Mezi nejdůležitější vlastnosti dielektrických materiálů patří relativní permitivita a ztrátový činitel. Znalost těchto parametrů nám dává informaci o tom, jak můžeme daný materiál použít. Důležitá je také znalost, jak se tyto materiály chovají při jiných podmínkách, než při jakých byly, prvotně měřeny. Tedy jak se bude dané dielektrikum chovat, vystavíme-li ho jiné teplotě nebo frekvenci. Dielektrické materiály se totiž nechovají stejně při 50 Hz a při 50 kHz. To samé platí i o teplotě.

Proto je cílem této práce zjistit jak se budou měnit sledované parametry vybraných materiálů v závislosti na teplotě, napětí a frekvenci.

2 DIELEKTRIKA OBECNĚ

„Dielektrikum je látka, která má po vložení do elektrického pole schopnost tvorby a existence vlastního vnitřního elektrického pole. Je to tedy látka se schopností se v tomto vnějším elektrickém poli polarizovat.“[1]

Látky, potažmo materiály používané v elektrotechnické praxi, lze obecně rozdělit do tří skupin. **První** skupina nám podává informaci o jejich struktuře. Tedy o jejich vnitřních vazbách. Tyto vazby mají zásadní vliv na chování materiálů. **Druhou** kategorií je dělení podle skupenství. Dielektrika a obecně látky lze rozdělit do tří skupenství. Rozlišujeme skupenství **plynná**, **kapalná** a **pevná**. A poslední, **třetí** možnost dělení je podle vlastností nosičů náboje. Jako nosiče náboje chápeme částice, které mají elementární náboj q (C). Tyto částice jsou tvořeny buď ionty nebo elektrony. Elementární náboj je roven náboji jedné volné částice tedy elektrickému náboji jednoho elektronu ($1.602\ 176\ 6208 \cdot 10^{-19}$ C).[2] Nosiče náboje lze rozdělit podle velikosti jejich vazebních sil uvnitř dané látky. Rozlišujeme tedy nosiče volné a vázané. Volné nosiče se neuspořádáně pohybují materiálem, proto materiály s velkým počtem těchto volných nosičů mají velkou elektrickou vodivost. Působení vnějšího elektrického pole na takovou látku má za následek to, že volné nosiče se začnou v látce pohybovat ve směru působení elektrického pole. Takovéto materiály se nazývají vodiče. Naopak vázané nosiče náboje jsou pevně drženy v krystalické mřížce daného materiálu. Vnější elektrické pole působí na takovéto nosiče pouze tím, že dané nosiče změni svojí polohu. Změnou polohy rozumíme větší či menší posun (natočení), který je mnohonásobně menší než je mřížková konstanta daného materiálu. Chování materiálu uvnitř elektrického pole je tedy závislé na koncentraci a druhu nosičů náboje. Materiály lze podle koncentrace volných nosičů rozdělit do tří skupin, v závislosti hodnoty jejich vodivosti γ je rozdělujeme následovně.[1;8]

Tab. 2.1: Vodivost materiálů [1]

	γ (S/m)
vodiče	$> 10^5$
polovodiče	10^{-8} až 10^5
izolanty	$< 10^{-9}$

Při rozdělování materiálů do jednotlivých skupin je nutné brát ohled na vnější podmínky, které na daný materiál působí. Mezi ně mimo jiné patří teplota, tlak, frekvence přiloženého napětí popřípadě intenzita elektrického pole. V technické praxi lze rozdělení uvedené v Tab. 2.1 brát jako pravdivé, ale je nutné brát v potaz, jakým podmínkám bude daný materiál vystaven.

Když se podíváme konkrétně na dielektrika, tak ty lze dále rozdělit do dvou skupin podle jejich vnitřní struktury, a to na dielektrika **polární** a **nepolární**. Jestliže na dielektrikum nepůsobí vnější elektrické pole, ale molekuly stejně obsahují permanentní elementární dipólový moment, pak se takové dielektrikum nazývá polární (H_2O , NH_3).[3] Molekuly nebo atomy nepolárního dielektrika neobsahují tento stálý dipólový moment (Ar , Xe , H_2 , CH_4 , Cl_2).[3] Dipólové momenty lze ovšem indukovat tím, že dielektrikum vložíme do elektrického pole. Mimo elektrické pole zůstává dielektrikum elektricky neutrální. Polárnost látek je důležitý pojem, který úzce souvisí s tím, jak se dané dielektrikum bude chovat po vložení do elektrického pole. Na tom pak závisí hodnota relativní permitivity a velikost dielektrických ztrát daného dielektrika.[1;8]

2.1 Interakce dielektrik s elektrickým polem

Vložíme-li dielektrikum do elektrického pole, začnou v něm působit děje, které nazýváme polarizačními procesy. Tyto procesy jsou závislé na stavbě a struktuře daného dielektrika. Na interakci dielektrika a elektrického pole můžeme nahlížet dvěma způsoby. První způsob, kterým lze pozorovat interakce dielektrik s elektrickým polem, je **makroskopické hledisko**. Toto hledisko nahlíží na dielektrikum jako na celek, pozorujeme pouze vnější projevy polarizačních jevů. Druhým případem je pozorování interakcí z **mikroskopického hlediska**. Při pozorování interakcí dielektrik se v tomto případě zajímáme pouze o elementární částice uvnitř dielektrik a jejich elektrizování.[1]

2.1.1 Makroskopické hledisko

Při pozorování interakcí dielektrik s elektrickým polem z makroskopického hlediska, hledíme na dané dielektrikum jako na celek a zajímá nás pouze výsledek polarizace. Na povrchu dielektrika tedy pozorujeme vázaný náboj, který se tam objeví v důsledku působení elektrického pole. To tedy znamená, že dielektrikum získá dipólový moment. Řádově se hodnoty dipólových momentů molekul pohybují 10^{-30} [Cm].[4] Na základě tohoto můžeme definovat vektor polarizace \vec{P} [C/m²], který popisuje polarizované dielektrikum a je definován jako objemová hustota dipólového momentu, tedy

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (2.1)$$

,kde $\Delta \vec{M}$ je dipólový moment objemového elementu ΔV daného dielektrika.

Mezi vektorem polarizace a intenzitou elektrického pole působícího na dielektrikum platí vztah

$$\vec{P} = \kappa \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

,kde κ je dielektrická susceptibilita (koeficient polarizace), ε_0 je permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).[2] Postupnými úpravami vztahu 2.2 se dopracujeme až ke vztahu 2.3, ze kterého je vidět, že jedním z nejdůležitějších parametrů dielektrik při makroskopickém pozorování je **relativní permitivita**. [1;8]

$$\varepsilon_r = 1 + \kappa \quad (2.3)$$

2.1.2 Mikroskopické hledisko

Když pozorujeme interakce dielektrik z mikroskopického hlediska, nedíváme se na něj jako na celek, ale jako na systém sestávající se z mnoha elementů. V případě dielektrik jsou těmito elementy nosiče elektrického náboje, pozorujeme tedy dielektrikum na úrovni jeho struktury. Projevem polarizace v tomto pohledu je vznik nových dipólových momentů nebo změna jejich orientace uvnitř dielektrika.

Vznik nových dipólových momentů

Dipóly vznikají působením vnějšího elektrického pole. Toto pole způsobí, že nosiče náboje uvnitř dielektrika změni svojí vzájemnou polohu. Tím se naruší vnitřní těžiště kladného a záporného náboje a vznikne dipól. Po odeznění působení vnějšího elektrického pole takto nově vzniklé dipólové momenty zanikají. Jedná se tedy o vratný děj.

Orientace stávajících dipólových momentů

Uvnitř některých dielektrik se již nacházejí dipólové momenty. Tyto dipóly jsou v látce pevně vázány a příčinou jejich vzniku není vnější elektrické pole ale chemické vazby, jimiž

dané konfigurace vznikají. Působením vnějšího elektrického pole dochází pouze k natáčení těchto vnitřních dipólů ve směru působení tohoto elektrického pole.

Polarizační jevy z pohledu mikroskopického lze charakterizovat pomocí **polarizovatelnosti**, která je označována jako α . Tato veličina nám udává míru změny dielektrika v elektrickém poli.

$$\varepsilon_r = 1 + n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_L \cdot \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \vec{E}} \quad (2.4)$$

Rovnice 2.4 nám ukazuje, že pro vyjádření relativní permitivity dielektrika musíme znát souvislost mezi vnitřním lokálním polem E_L a vnějším elektrickým polem E .

2.1.3 Lokální pole v dielektriku

Vnitřní lokální pole uvnitř dielektrika respektuje interakce jednotlivých částic mezi sebou. Toto vnitřní pole se skládá ze dvou složek, první složka je tvořena vnějším polem a druhá složka je tvořena vektorovým součtem elektrických polí všech částic, které obklopují danou částici.

Pro výpočet vnitřního lokálního pole existuje mnoho metod, nejčastěji je používána metoda, která byla odvozena fyzikem Henrikem Antoonem Lorenzem. Metoda je založena na tom, že kolem dané částice opíšeme pomyslnou kružnici o poloměru R . Tento poloměr musí být dostatečně velký na to, aby bylo možné považovat prostředí vně koule za izotropní, ale zároveň musí být tento poloměr podstatně menší, než je vzdálenost elektrod. Jestliže jsou tyto podmínky splněny lze pak intenzitu lokálního pole v dielektriku určit jako vektorový součet složek podle vztahu[1]

$$\vec{E}_L = \vec{E} + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2.5)$$

,kde \vec{E} je intenzita vnějšího pole, \vec{E}_1 je intenzita elektrického pole od částic vně koule a \vec{E}_2 je intenzita elektrického pole uvnitř dané koule.

Složitou matematikou se lze dopracovat až ke vztahu 2.6, ze kterého je patrné, že ve vakuu ($\varepsilon_r = 1$) je intenzita lokálního elektrického pole stejná jako intenzita vnějšího elektrického pole.

$$\vec{E}_L = \frac{\varepsilon_r + 2}{3} \cdot \vec{E} \quad (2.6)$$

2.2 Mechanizmy polarizace

Je-li dielektrikum vloženo do elektrického pole, začne v jeho objemu proces zvaný polarizace. Polarizace dielektrika je závislá na jeho atomové a molekulové struktuře. Obecně v dielektriku probíhá více polarizačních jevů zároveň. Celkový polarizační jev je superpozicí jednotlivých polarizačních mechanismů. Polarizace lze rozdělit do několika skupin. První dělení je podle toho, zda došlo k zpolarizování dielektrika za působení elektrického pole či nikoliv. Pro účely téhle práce se budeme zabývat dielektriky, ve kterých dochází k polarizaci až po vložení do elektrického pole. Polarizace, které jsou vyvolané vnějším elektrickým polem lze rozdělit podle toho, jaké částice uvnitř dielektrika se podílejí na jeho polarizaci. Je-li polarizace vyvolaná posunem silně vázaných částic uvnitř objemu dielektrika, pak se taková polarizace nazývá **deformační**. Dojde-li vlivem elektrického pole k posunu slabě vázaných nosičů náboje uvnitř dielektrika, mluvíme pak o **relaxační polarizaci**. Vlivem elektrického pole se můžou uvnitř dielektrika pohybovat i volné nosiče náboje. Polarizace, která vzniká vlivem pohybu volných nosičů uvnitř dielektrika, se nazývá **migrační**. [1;8]

2.2.1 Deformační polarizace

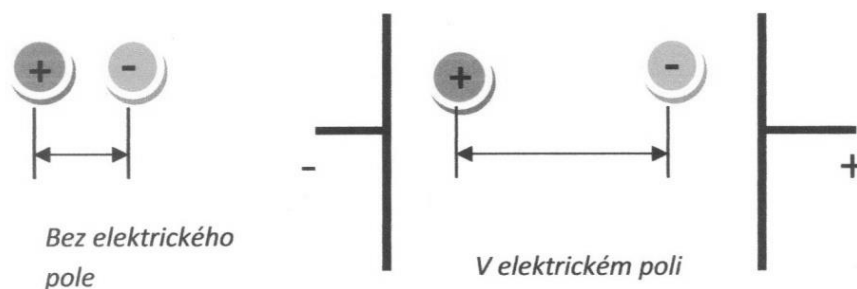
Nosič náboje u tohoto typu polarizace je obvykle elektron, kladně nabitý iont nebo dipól, který je vázán v dielektriku. U deformačních polarizací dochází pouze k malému posunutí náboje uvnitř látky vlivem vnějšího elektrického pole. Avšak vliv takovéto polarizace na celkovou permitivitu dielektrika je značný, jelikož dochází k posunu značného množství elementárních nábojů uvnitř objemu dielektrika. Elementární náboje se posouvají na velmi krátké vzdálenosti, proto je čas na ustálení polarizace taktéž velice krátký (10^{-16} až 10^{-13} s).[1] Z toho plyne, že po odeznění vlivu vnějšího elektrického pole dochází velmi rychle k navrácení původního neutrálního stavu v dielektriku. Deformační polarizace nejsou závislé na tlaku či teplotě, pochopitelně za předpokladu, že teplo či tlak nejsou dostatečně velké, aby způsobovaly změny ve struktuře dané látky. Díky tomu, že jsou náboje pevně vázány v krystalické mřížce, jsou deformační polarizace bezztrátové. Deformační polarizace lze rozdělit do několika skupin, a to na **elektronovou polarizaci**, **iontovou polarizaci** a na **dipólovou polarizaci**. [1;8]

2.2.1.1 Elektronová polarizace

Elektronová polarizace se vyskytuje u všech druhů látek všech skupenství. Představíme-li si atom, který není vložen do elektrického pole, pak jeho celkový elektrický náboj bude neutrální. Vložíme-li tento atom do vnějšího elektrického pole, začne na jeho elementární náboje působit toto vnější elektrické pole, které způsobí to, že dojde k jejich posunutí. To má za následek, že z elektricky neutrálního atomu se stane dipól. Vzdálenost, o kterou se částice uvnitř atomu posunou, je dána intenzitou vnějšího elektrického pole a lze ji popsat vztahem

$$x = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{r^3}{Z_e} \cdot E$$

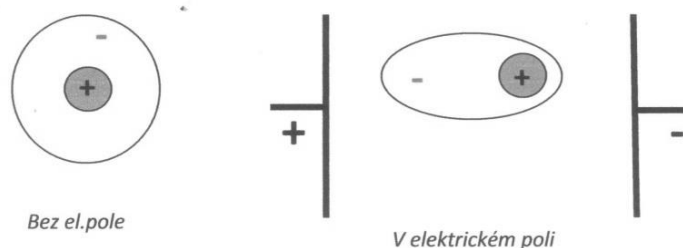
, kde x je vzdálenost, o kterou se náboje posunou vůči středu atomu, Z_e je náboj elektronového oblaku, E je intenzita vnějšího elektrického pole a r je poloměr atomového jádra.[1]



Obr. 2.1: Elektronová polarizace [14]

2.2.1.2 Iontová polarizace

Iontová polarizace je způsobena pohybem iontů v krystalické mřížce dielektrika. Rozdíl mezi iontovou a elektronovou polarizací je ten, že při iontové polarizaci nedochází jen ke změně elektronové polarizace ale také ke změně orientace takto vzniklých dipólů. Doba ustálení iontové polarizace je přibližně 10^{-13} s. Opět se jedná o bezztrátovou polarizaci, která je frekvenčně nezávislá.[5]



Obr. 2.2: Iontová polarizace [14]

2.2.1.3 Dipólová polarizace

Vyskytuje se u pevných látek, které mají molekuly vázané pružnými vazbami. V podstatě je dipólová polarizace stejná jako iontová polarizace.

2.2.2 Relaxační polarizace

Zásadní rozdíl mezi relaxační a deformační polarizací spočívá v čase průběhu dané polarizace. Na relaxační polarizaci se podílejí slabě vázané částice, molekuly plynných či kapalných dielektrik. U pevných dielektrik se na relaxační polarizaci podílejí nabitě částice, které se vyskytují u defektů v krystalické mřížce. Díky tomu, že jsou částice slabě vázány, může nastávat tepelný pohyb částic uvnitř dielektrika, a proto mohou tyto částice snadno překonávat potenciálové bariéry. Jelikož se ale tyto částice vlivem tepelného pohybu zcela chaoticky pohybují, nevzniká v dielektriku žádné nerovnoměrné rozložení náboje, a proto se z makroskopického hlediska jeví dielektrikum jako neutrální. Z této skutečnosti plyne, že relaxační polarizace je silně závislá na okolní teplotě. Jestliže takové dielektrikum vložíme do elektrického pole, změníme v něm poměry, díky kterým budou slabě vázané částice častěji zaujímat určité polohy. Vznikne tak nerovnoměrné rozložení náboje, a tím pádem **dipól**. Bez vnějšího elektrického pole nemůže relaxační polarizace vzniknout.[1]

Další podstatný rozdíl mezi relaxační a deformační polarizací je v čase, za který daný děj proběhne. Jak bylo popsáno výše, deformační polarizace proběhnou za cca 10^{-16} až 10^{-13} s, zatím co u relaxačních polarizací je tento čas daleko delší a to cca 10^{-12} až 10^{-8} s. Průběh relaxační polarizace lze popsat exponenciálou. Časová konstanta tohoto jevu se nazývá **relaxační doba** τ a je důležitou hodnotou polarizace.[1]

Z výše uvedeného textu plyne, že relaxační polarizace jsou silně závislé na teplotě a na frekvenci přiloženého napětí.

Rozlišujeme dva druhy relaxační polarizace. Prvním druhem je **iontová relaxační polarizace**, druhým je **dipólová relaxační polarizace**.

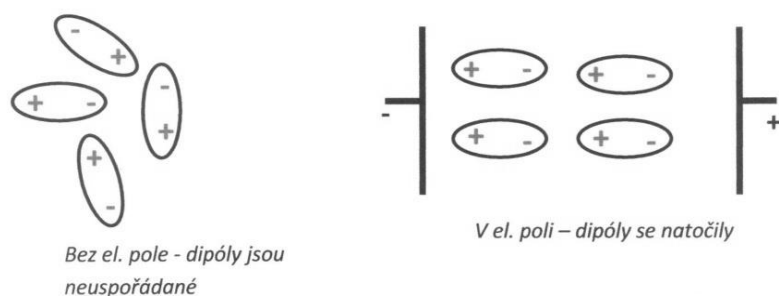
2.2.2.1 Iontová relaxační polarizace

Tento druh polarizace se vyskytuje v látkách, které jsou složené z iontů, nebo obsahují příměsi či nečistoty, které jsou tvořeny právě ionty. Jedná se tedy o amorfní látky, mezi které patří, anorganická skla, keramické látky s obsahem skla nebo anorganické krystalické látky. Společným jmenovatelem všech těchto látek je to, že mají netěsné vazby, které drží jednotlivé částice u sebe.[1]

2.2.2.2 Dipólová relaxační polarizace

Dipólová relaxační polarizace se uplatňuje v polárních látkách (látky, které obsahují dipólové monety i bez působení vnějšího elektrického pole). Příkladem takové látky je voda. Vnější elektrické pole působí na tyto vnitřní dipóly tak, že je nutí se otáčet do směru, ve

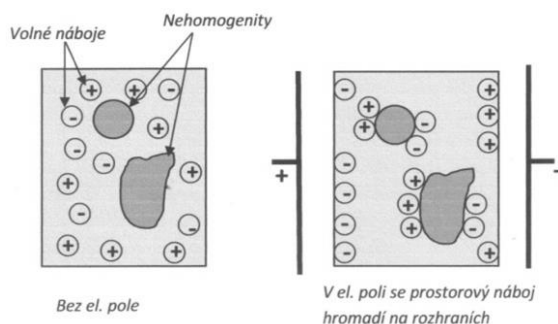
kterém působí vnější elektrické pole. Proti tomuto poli působí tepelný pohyb částic. Z toho plyne, že dipólová relaxační polarizace je silně závislá na teplotě.[1]



Obr. 2.3: Dipólová relaxační polarizace [14]

2.2.3 Migrační polarizace

Migrační polarizaci dielektrik způsobují volné nosiče náboje. Tyto volné náboje způsobují prostorový náboj v dielektriku. Aby mohl takový prostorový náboj vzniknout, je zapotřebí existence makroskopických nehomogenit v objemu dielektrika. Na těchto nehomogenitách se následně zachycují volné elektrony, které putují skrz dielektrikum a vytváří na nich již zmíněné prostorové náboje.



Obr. 2.4: Rozložení prostorového náboje [14]

Jako nehomogenitu v dielektriku lze chápat buď všelijaké nečistoty, bublinky, vakuolu, prasklinku nebo jiné strukturální defekty. Nehomogenita je oblast, která má jiné strukturální vlastnosti, než zbytek látky, ve které se nachází (relativní permitivitu, vodivost). Mezi nehomogenity v dielektrikách patří také rozhraní dvou složených dielektrik. Migrační polarizace jsou nejpomalejším typem z výše zmíněných polarizací.[1]

Důležitým faktorem pro vznik prostorového náboje jsou volné nosiče náboje a ty, jak víme, se v dielektrikách (v dostatečném množství) nevyskytují. Jejich majoritním zdrojem jsou zejména v polymerních materiálech elektrody, které přiléhají k dielektriku. Tento jev se nazývá vstřikování nosičů náboje. V případě katody mluvíme o vstřikování elektronů, v případě anody o vstřikování děr.[1]

Velký vliv na prostorový náboj má teplota a velikost přiloženého napětí. Vliv prostorového náboje je zásadní na intenzitu elektrického pole v tloušťce dielektrika. Se zvětšujícím se prostorovým nábojem klesá elektrická pevnost materiálu v daném místě, a to může mít za následek překročení elektrické pevnosti dielektrika. To má za následek vznik parciálních výbojů v objemu dielektrika.[1]

2.3 Elektrická vodivost dielektrik

Veškeré dielektrické materiály používané v elektrotechnické praxi vykazují určité nedokonalosti v oblasti vedení elektrického proudu. Každé reálné dielektrikum obsahuje určité množství volných nebo slabě vázaných nosičů náboje, které způsobují vodivost dielektrika. Ve většině případů je vodivost dielektrika způsobená iontovou vodivostí. Při měření vodivosti dielektrik je zapotřebí si dát pozor na to, že zpočátku po připojení napětí na dielektrikum neprochází dielektrikem jen svodový proud, ale také proud polarizační, který nám hodnotu svodového proudu zvětšuje. Proto je nutné po přiložení napětí na dielektrikum počkat určitou dobu (jednu minutu [5]), abychom měřili jen svodový proud už bez polarizačních proudů. Tento polarizační proud se také nazývá proud absorpční.[1]

U dielektrik rozeznáváme dva druhy vodivosti, **vodivost objemovou** a **vodivost povrchovou**. Hodnota elektrické vodivosti se udává jako převrácená hodnota rezistivity.

Aby bylo možné porovnávat jednotlivá dielektrika, zavedly se pojmy měrná objemová vodivost γ_v a měrná povrchová vodivost γ_p , které lze vypočítat podle vztahů.

Pro měrnou objemovou vodivost to je

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v} \text{ (S/m)} \qquad \rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h} \text{ (\Omega m)} \qquad (2.7)$$

kde ρ_v se rovná rezistivitě krychle o straně 1cm, když proud protéká mezi dvěma protilehlými stranami, S je plocha elektrody a h je tloušťka vzorku.

Pro měrnou povrchovou vodivost

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s} \text{ (S/m)} \qquad \rho_s = R_s \cdot \frac{l}{h} \text{ (\Omega)} \qquad (2.8)$$

kde ρ_s je měrná povrchová rezistivita čtvercové plochy měřená mezi protilehlými stranami čtverce, R_s je povrchový odpor materiálu měřený mezi rovnoběžně postavenými elektrodami délky l , které jsou vzdálené vzdáleností h .

Elektrická vodivost dielektrik závisí na vlhkosti a teplotě okolního prostředí, její hodnota je také silně závislá na kondici daného dielektrika (znečištění, atd.).

2.3.1 Elektrická vodivost pevných dielektrik

Obecně lze pevná dielektrika rozdělit do tří skupin podle jejich struktury a to na **iontově krystalické materiály**, **anorganické amorfni materiály** a na **organické amorfni materiály**.

2.3.1.1 Iontově krystalické materiály

U tuhých dielektrik se uplatňují dva druhy vodivosti. První je elektronová, která se uplatňuje od hodnot intenzity elektrického pole 10^1 až 10^2 kV/mm.[1] Druhá je iontová vodivost. Iontovou vodivost může způsobit buď pohyb kladných iontů v krystalové mřížce nebo pohyb slabě vázaných iontů příměsí a nečistot. Teplota dielektrika má zásadní vliv na elektrickou vodivost, ionty pevně vázané v krystalické mřížce se při nízkých teplotách nemohou volně pohybovat, proto se nemohou účastnit vodivosti, zato slabě vázané ionty mohou. Z tohoto plyne, že při nízkých teplotách se elektrické vodivosti účastní jen slabě vázané ionty vlastní látky a ionty nečistot. Jakmile ale dielektrikum vystavíme vysokým teplotám, zvětšíme tím tepelný pohyb iontů pevně vázaných v krystalické mřížce, což jim umožní se z této mřížky vytrhnout, -pohybovat se v dielektriku a vést proud. Mezi iontově krystalické látky patří například NaCl, parafín, ceresin, halový vosk.[5]

2.3.1.2 Anorganické amorfny materiály

Mezi anorganické amorfny materiály patří různé druhy skel. Vodivost skel silně závisí na složení daného skla a pohybuje se v rozmezí 10^{-3} až 10^{-17} S/m.[1] Nejmenší elektrickou vodivost vykazují čistá křemičitá skla SiO_2 nebo skla boritá B_2O_3 . [1] Existují pak různá technická skla, která jsou tuhým roztokem kysličníku křemičitého a různých kysličníků kovů. Přidáváním různých alkalických kovů do skel se mění jejich mechanické a elektrické vlastnosti, což má za následek zvětšení jejich elektrické vodivosti. Vodivost skel má čistě iontový charakter, který je způsoben ionty alkalických kovů.[5]

Vodivost keramických materiálů je způsobena především vodivostí amorfny. Mezi nejkvalitnější keramické izolanty patří slinutý korund Al_2O_3 . Ultraporcelán vznikl ze směsi kaolinu a kysličníku bárya. Tyto dva izolanty vykazují vysoký izolační odpor, který je možno měnit až nad teploty $200\text{ }^\circ\text{C}$. [5]

2.3.1.3 Organické amorfny materiály

Mezi organické amorfny materiály patří například polyethylén, polyvinylchlorid, polymethylmetakrylát. Vodivost těchto materiálů se pohybuje pod hodnotou 10^{-17} S/m.[1] Nežádoucími příměsemi, které zvětšují elektrickou vodivost organických materiálů, jsou například voda (vlhkost), různá rozpouštědla nebo plnidla či různá barviva.

2.3.1.4 Povrchová vodivost pevných dielektrik

Ve výše popsaném textu jsme nahlíželi na elektrickou vodivost dielektrik, jako na proud, který teče objemem dielektrika. Ovšem u pevných dielektrik se kromě objemové vodivosti uplatňuje i vodivost povrchová.

Tato vodivost je definovaná vztahem

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E} \text{ (S/m)} \quad (2.9)$$

kde I_p je proud tekoucí povrchem izolantu a, E je intenzita elektrického pole. Na povrchovou vodivost dielektrik má největší vliv relativní vlhkost okolí. Povrchová elektrická vodivost je tím nižší, čím menší je polárnost hmoty.

Podle toho, jak se chová povrch dielektrika při dotyku s vodou, rozdělujeme dielektrika na hydrofilní (vodu smáčivé) a dielektrika hydrofobní (vodou nesmáčivé). Podle toho jak se dielektrikum chová při kontaktu s vodou lze definovat tři skupiny:

- **Dielektrika ve vodě nerozpustná** mohou být nepolární, mezi ta patří parafin, ceresin, polystyrol, síra, jantar, teflon. Tato dielektrika jsou vodou nesmáčecí. Mezi dielektrika ve vodě nerozpustná patří také dielektrika polární. Jsou vodou smáčena a patří mezi ně některé druhy keramických hmot.
- **Dielektrika ve vodě částečně rozpustná**, mezi která patří celá řada technických skel nebo slída.
- **Pórovitá dielektrika**, mezi něž patří materiály jako mramor, šamot, břidlice, keramiky pro el. topidla a, různé plastické materiály. Tyto materiály vykazují velkou elektrickou vodivost ve vlhkém prostředí.

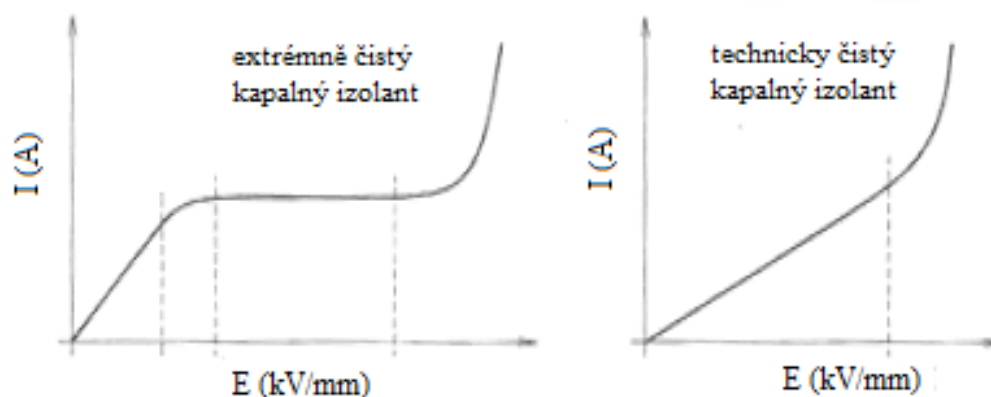
Jednou z možností, jak zvýšit hodnotu povrchového odporu je nanést organicko-křemičitý lak na povrch dielektrika.[5]

Proto mají VN kabelové koncovky a veškeré izolátory tzv. sukýnky. Ty jsou tam z důvodu zmenšení povrchové vodivosti, a tím pádem zvětšení povrchového odporu izolačních materiálů.

2.3.2 Elektrická vodivost kapalných dielektrik

Elektrická vodivost kapalných dielektrik silně závisí na stavbě molekul, z nichž se dané dielektrikum skládá. Nepolární a slabě polární dielektrika vykazují jen velmi malou elektrickou vodivost, zatímco polární tekutiny, například voda, vykazují vodivost velmi velkou, proto je nelze jako dielektrika využít.

Další, co má vliv na elektrickou vodivost kapalných dielektrik, je přítomnost disociovaných přísad, zejména vlhkosti. Z tohoto hlediska rozdělujeme kapalná dielektrika podle stupně rafinace na **extrémně čistá** a **technicky čistá**. Extrémně čistá kapalná dielektrika vykazují elektrickou vodivost v rozmezí 10^{-14} až 10^{-15} S/m, zatímco technicky čistá jenom 10^{-11} až 10^{-12} S/m.[1] Rozdíl mezi extrémně čistým a technicky čistým kapalným dielektrikem lze pozorovat na obrázku 2.5.[1]



Obr. 2.5: Rozdíl mezi extrémě čistým a technicky čistým kapalným dielektrikem [1]

Z obrázku je patrné, že v charakteristice extrémně čistého dielektrika se vyskytuje oblast nasyceného proudu, zatímco u technicky čistého nikoliv.

Koloidní částice mají také značný vliv na elektrickou vodivost kapalných dielektrik. Tento typ částic se vyskytuje v kompaudech olejoprkyřných nebo u olejů s malým obsahem emulgované vody.[5] Vodivost způsobená těmito částicemi se nazývá elektroforetickou. Tato vodivost je tvořena dvěma částmi. První část se nazývá disperzní fáze, tuto fázi představují jemné částičky (pevné částičky nečistot, kapičky vody, atd.), které jsou rozptýlené ve fázi druhé, která se nazývá disperzní prostředí. V kapalných dielektrikách se vyskytují jak emulze, kde obě fáze jsou kapaliny, tak suspenze, kde disperzní fázi jsou právě tyto jemné částičky, a disperzním prostředím je kapalina, v níž jsou tyto částičky rozptýleny.[5]

Elektrická vodivost je silně závislá na teplotě kapaliny a je úzce spjatá s její viskozitou. V tabulce níže lze vidět závislost teploty transformátorového oleje na jeho vodivosti a viskozitě.[5]

Tab. 2.2 Závislost vodivosti transformátorového oleje na teplotě [5]

t (°C)	γ (S/m)	η (Pa.s)
20	$2,5 \cdot 10^{-13}$	0,4
40	$7,0 \cdot 10^{-13}$	0,22
60	$1,6 \cdot 10^{-13}$	0,13
100	$2,8 \cdot 10^{-12}$	0,08
120	$4,1 \cdot 10^{-12}$	0,06

2.3.3 Elektrická vodivost plyných dielektrik

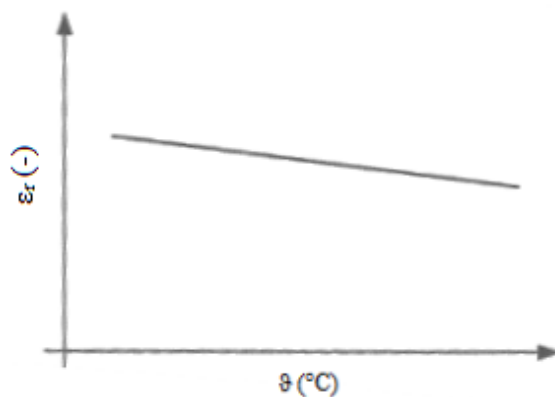
Pokud je plyn vystaven jen velmi slabému elektrickému poli a nízkým teplotám, tak ho lze považovat za výborný izolant. To je způsobeno tím, že v plynu je jen velmi málo volných nosičů náboje. Tyto náboje mohou v plynu vzniknout jen dvěma způsoby. Prvním z nich je ionizace plynu vnějšími vlivy, jako je radioaktivní záření, dopad kosmického záření z vesmíru nebo přímý ohřev plynu plamenem. Vodivost plynu způsobená těmito druhy ionizace se nazývá **nesamostatná**. Druhý způsob ionizace plynu je při velmi vysokých intenzitách elektrického pole, kde tato intenzita urychlí volné nosiče, které se v plynu nachází. Takto urychlené nosiče náboje pak získají dostatečnou kinetickou energii nato, aby mohly dál plyn ionizovat, a způsobí tak nárazovou ionizaci plynu. Vodivost, kterou způsobí nárazová ionizace, se nazývá **samostatná**. [1]

Je-li intenzita elektrického pole větší jak 1 kV/mm, začne se projevovat nárazová ionizace vzduchu. To má za následek exponenciální nárůst proudové hustoty a tím vzduch ztrácí svoje elektroizolační vlastnosti. [1]

2.4 Dielektrikum v elektrostatickém poli

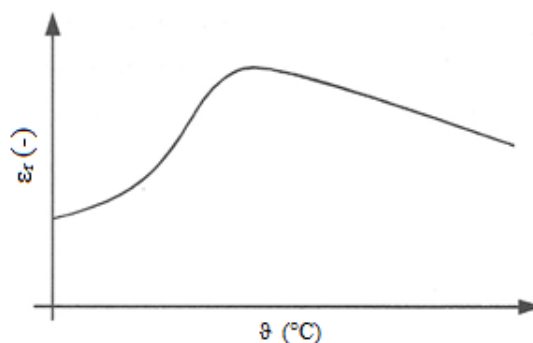
Vložíme-li neutrální dielektrikum do statického elektrického pole, tak vlivem mechanismů polarizace se na jeho povrchu objeví elektrický náboj. Hlavní veličina, která popisuje chování dielektrika v statickém elektrickém poli je **statická relativní permitivita ϵ_r** .

U nepolárních dielektrik statická relativní permitivita s rostoucí teplotou dielektrika klesá, jak je vidět na obrázku 2.6. To je způsobeno tím, jak se zvětšující se teplotou roste objem dielektrika, a tím se jeho molekuly od sebe vzdalují a proto se navzájem méně ovlivňují. [1]



Obr. 2.6: Závislost relativní permitivity na teplotě [1]

Závislost teploty a statické relativní permitivity u kapalných dielektrik lze vidět na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Závislost relativní permitivity na teplotě pro kapalná dielektrika [1]

Z něj je patrné, že při nízkých teplotách se dipóly uvnitř dielektrika nejsou schopny orientovat, z čehož vyplývá, že se v dielektriku uplatňují jen deformační polarizace stejně jako u nepolárních látek. Se zvětšující se teplotou dielektrika klesá jeho viskozita, což má za následek nárůst pohyblivosti molekul, které se pak ve vnějším elektrickém poli snadněji orientují do směru jeho působení. Tento proces má za následek nárůst hodnoty statické relativní permitivity. Jakmile hodnota dosáhne svého maxima, začne opět klesat. Příčinou toho jevu je to, že s vzrůstající teplotou roste i chaotický tepelný pohyb molekul, který působí proti snaze vnějšího pole orientovat dipóly uvnitř dielektrika.[1]

U pevných dielektrik lze díky složitosti jejich struktury konstatovat, že není teorie, která by popsala jejich situaci. Určitými vztahy lze popsat jen nepolární pevná dielektrika.

2.5 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

Při popisu dielektrik ve střídavém poli musíme brát na zřetel kinetické vlastnosti částic, které jsou obsaženy v objemu dielektrika. Tato setrvačnost částic způsobuje fázový posun mezi vektorem elektrické indukce \vec{D} a vektorem intenzity elektrického pole \vec{E} o úhel δ . Vztah pro výpočet okamžitých hodnot elektrické indukce a intenzity elektrického pole má tvar

$$\vec{D}_m \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^* \cdot (j\omega) \cdot \vec{E}_m \quad (2.10)$$

kde \vec{D}_m je amplituda magnetické indukce a \vec{E}_m amplituda intenzity elektrického pole, δ je úhel, o který je posunut vektor magnetické indukce proti vektoru intenzity elektrického pole a $\varepsilon^* \cdot (j\omega)$ je frekvenčně závislá komplexní relativní permitivita pro kterou platí

$$\varepsilon^* \cdot (j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (2.11)$$

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

Vložíme-li neutrální nepolární dielektrikum do střídavého elektrického pole, pak v důsledku mnohem větší hmotnosti jádra vůči elektronům zůstane toto jádro v klidu, naopak elektrony díky své relativně malé hmotnosti začnou kolem tohoto stabilního jádra kmitat v rytmu frekvence přiloženého napětí. Kmitání elektronů způsobuje emisi elektromagnetického záření, které má za následek útlum těchto kmitů. Toto záření je vyzařováno v ultrafialové oblasti elektromagnetického spektra.[5]

U iontové polarizace platí obdobný jev, jako u elektronové polarizace popsané v odstavci výše, s tím rozdílem, že vyzařované elektromagnetické záření leží v infračervené oblasti elektromagnetického spektra.

Z tohoto zjištění plyne, že se v dielektriku musí absorbovat určitá část energie vnějšího elektrického pole. Tyto ztráty se označují jako **dielektrické ztráty**.

Vložíme-li polární dielektrikum do střídavého elektrického pole, pak od určité frekvence nebudou dipóly schopny sledovat proměnlivost elektrického pole, orientační polarizace klesne na nulu a bude se uplatňovat jen elektronová nebo iontová polarizace. Z výše uvedeného plyne, že jednotlivé druhy polarizace nemají stejný příspěvek při různých frekvencích na permitivitu daného dielektrika.[1]

Na obrázku 2.8 jsou vidět příspěvky jednotlivých polarizací s měnící se frekvencí v technickém dielektriku.



Obr. 2.8: Příspěvky jednotlivých polarizací k relativní permitivitě v závislosti na frekvenci[1]

Z obrázku je patrné, že při nízkých frekvencích mají všechny uvažované druhy polarizací vliv na velikost permitivity. Se zvětšující se frekvencí nejdřív ustane mezivrstevová polarizace a následuje ji dipólová relaxační polarizace. Jakmile frekvence elektrického pole dosáhne optických frekvencí, uplatňují se už jen optické polarizace.

2.6 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty nám udávají, kolik elektrické energie se díky polarizačním a jiným dějům odehrávajících se v objemu dielektrika přemění na teplo. Tento jev způsobuje, že se dané dielektrikum zahřívá. V určitých aplikacích je tohoto jevu využíváno, například při takzvaném dielektrickém ohřevu. Ovšem v elektroizolační technice je tento jev nežádoucí, a proto je nutné zajistit, aby se vzniklé teplo účinně odvádělo z objemu dielektrika do okolí, aby nedocházelo k lokálnímu přehřívání dielektrika, což by mohlo mít za následek tepelný průraz a tím i jeho znehodnocení.[1]

Součástí dielektrických ztrát jsou ztráty vodivostní, které vznikají průchodem vodivostního proudu dielektrikem, který teče buď objemem dielektrika, nebo po jeho povrchu. Součástí dielektrických ztrát jsou také ztráty způsobené relaxačními polarizacemi. Další věcí, která přispívá k dielektrickým ztrátám, jsou migrační polarizace. Součástí dielektrických ztrát jsou také ionizační ztráty, které vznikají v případě, že dielektrikum vystavíme střídavému elektrickému poli, pak mohou v jeho objemu vlivem nehomogenit vznikat částečné výboje, které mají degradační účinek na materiál dielektrika.[1]

Dielektrické ztráty existují jak při stejnosměrném, tak i při střídavém elektrickém poli a tvar napěťové křivky na ně nemá vliv.

V případě, že dielektrikum vložíme do statického elektrického pole, začne dielektrikem procházet vodivostní proud, díky kterému začnou vznikat v objemu dielektrika Jouleovy ztráty. Velikost těchto ztrát je přímo úměrná velikosti vodivostního proudu, který daným dielektrikem teče, dále je velikost Jouleových ztrát dána izolačním odporem dielektrika. Pak lze pro tento ztrátový výkon psát vzorec

$$P_{zDC} = R_i \cdot I^2 \text{ (W)} \quad (2.12)$$

,kde R_i je izolační odpor dielektrika a I je ustálený vodivostní proud procházející dielektrikem.

Pokud ovšem dielektrikum vystavíme střídavému elektrickému poli, začnou se v jeho objemu uplatňovat nejen vodivostní ztráty, ale i ztráty způsobené polarizačními mechanismy. Pro popis dielektrických ztrát ve střídavém poli se zavedl pojem **ztrátový úhel** δ . V technické

praxi se pro hodnocení ztrát dielektrika používá parametr, který vychází z tangenty ztrátového úhlu takzvaný **ztrátový činitel** $\operatorname{tg} \delta$. Pro velikost ztrát v dielektriku, které je vystaveno střídavému poli pak lze psát vztah

$$P_{zAC} = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (\text{W}) \quad (2.13)$$

,kde I_c je proud, který by procházel ideálním dielektrikem, U je velikost napětí, které je na dané dielektrikum přiloženo a $\operatorname{tg} \delta$ je velikost ztrátového činitele.[1]

2.6.1 Dielektrické ztráty v pevných dielektrikách

Dielektrické ztráty v pevných dielektrikách jsou podmíněné jejich strukturou, proto je nutné je zkoumat v závislosti na druhu pevného dielektrika.

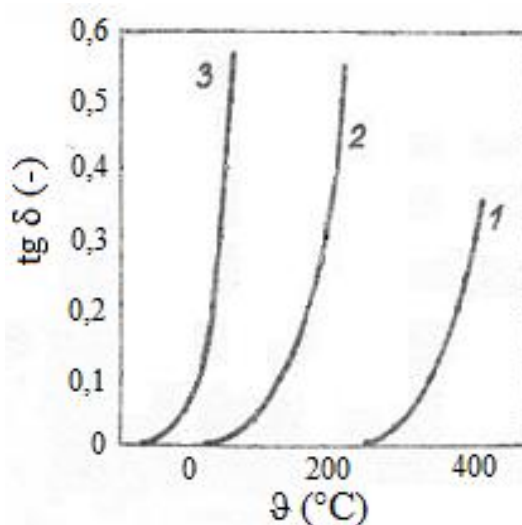
2.6.1.1 Dielektrické ztráty v krystalech

V čistých organických krystalech jako jsou NaCl nebo KCl, které jsou vystaveny střídavému elektrickému poli, se uplatňují jen bezztrátové polarizace (elektronové, iontové). Avšak pokud jsou v těchto krystalech přítomny nečistoty, jejich ztráty jsou mnohonásobně větší. To je důvod, proč se tyto materiály v izolační technice nevyskytují.

Mezi anorganické krystaly patří slída. Je to jediný typ z této skupiny materiálů, které se v izolační technice využívají. Dielektrické ztráty slídy jsou z větší části tvořeny vodivostními ztrátami. Ztrátový činitel muskovité slídy je při 50 Hz a 60 °C přibližně $3 \cdot 10^{-3}$. [5]

2.6.1.2 Dielektrické ztráty v amorfních sklech

V dielektriku z amorfního skla, které je vystaveno střídavému elektrickému poli, dochází jak ke ztrátám vodivostním, tak ke ztrátám způsobeným polarizacemi. Dielektrické ztráty silně závisí na složení daného skla. Nejmenší ztráty má čisté borité nebo křemičité sklo. Přidání jednomocných oxidů (Na_2O , K_2O) do takového skla má za následek nárůst jak vodivostních, tak polarizačních ztrát. Přidáním dvojmocných kyslíčků (CaO , PbO , BaO) se zpevní struktura daného skla, a tím se zmenší ztráty daného dielektrika. Závislost ztrátového činitele při 50 Hz na teplotě pro různé koncentrace Na_2O v boritém sklu lze vidět na obrázku 2.9.[5]



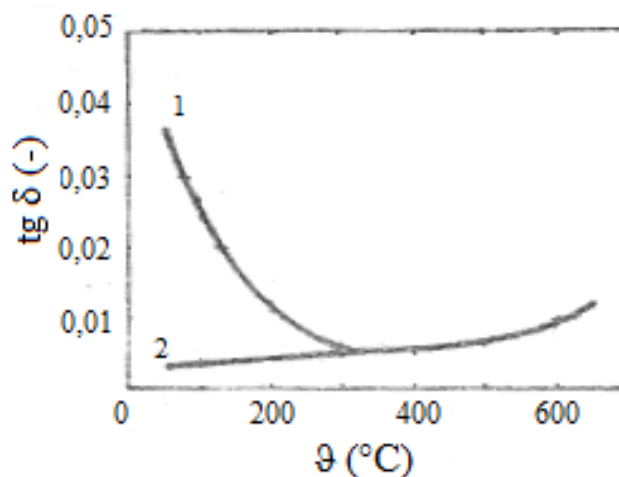
Obr. 2.9: Závislost ztrátového činitele na koncentraci Na_2O [5] - upraveno

Křivka 1 značí koncentraci 0%, křivka 2 19,3% a křivka 3 38,6%.

2.6.1.3 Dielektrické ztráty v keramických dielektrikách

Velikost ztrát u keramických dielektrik závisí hlavně na poměru mezi amorfni a krystalickou fází v materiálu. Celkové ztráty v takovém dielektriku jsou pak součtem ztrát amorfni a keramické fáze.

Mezi keramická dielektrika patří elektrotechnický porcelán. Tento porcelán obsahuje kromě krystalického mullitu i amorfni fázi alkalického skla. Takový porcelán není kvalitním dielektrikem z důvodu, že přidané amorfni sklo zvyšuje jeho dielektrické ztráty. Pro snížení ztrát se do porcelánu místo živice přidává tavidlo s dvojmocným kationtem (BaO).[5] Přidáním takového tavidla do porcelánu získáme vysokofrekvenční radioporcelán. Důležitým aspektem keramických dielektrik je stupeň jejich vypálení. Čím lepší je vypálení, tím menší ztráty dané dielektrikum má. Je to způsobeno tím, že když není vypálení dostatečné, zůstávají na povrchu dielektrika póry, ve kterých se může zachytávat vzdušná vlhkost. To je pak příčinou zvětšení ztrátového činitele, a tím i celkových ztrát daného dielektrika. Na obrázku je vidět závislost ztrátového činitele pro špatně vypálené dielektrikum a pro dobře vypálené dielektrikum. Použité dielektrikum je v tomto případě korund.[5]



Obr. 2.10: Rozdíl mezi dobře vypáleným a špatně vypáleným korundem [5] - upraveno

Křivka 1 označuje teplotní závislost špatně vypáleného korundu, křivka 2 znázorňuje teplotní závislost dobře vypáleného korundu.

Jak je vidět z obrázku, při teplotě cca 300 °C se charakteristiky spojí. To je důsledkem toho, že při dané teplotě se odpaří veškerá voda z povrchu, a tím pádem nemůže přispívat ke zhoršování ztrátového činitele.

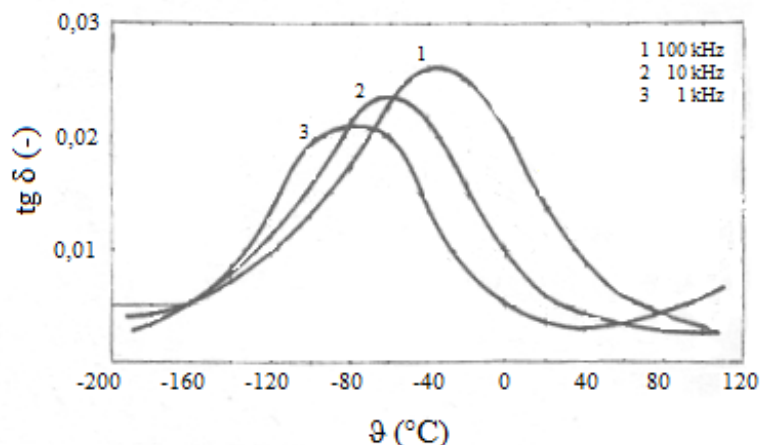
2.6.1.4 Dielektrické ztráty v nepolárních organických dielektrikách

Do této skupiny pevných dielektrik patří krystalické látky jako parafin, ceresin nebo naftalin. Amorfni látky zastoupené v této kategorii jsou polyetylen, teflon, polystyrol aj. U všech těchto látek, se v čistém stavu nevyskytují polární molekuly, a proto se u nich nevyskytují ztrátové polarizace. Příčinou nepatrných ztrát jsou jen vodivostní ztráty.[5]

2.6.1.5 Dielektrické ztráty v polárních organických dielektrikách

Mezi polární organická dielektrika patří především látky na bázi celulózy, tedy papír, lepenka, pak polární polymery (silon, nylon), dalšími látkami jsou ebonit a fenolformaldehydové pryskyřice-bakelit.[5] Ve všech těchto látkách nalezneme polární molekuly, z čehož plyne, že ve všech se uplatňují relaxační polarizace. A proto mají tyto látky

mnohem vyšší dielektrické ztráty než nepolární dielektrika. Na obrázku je vidět závislost ztrátového činitele na teplotě pro vysušený papír a pro různé frekvence přiloženého napětí.[5]



Obr. 2.11: Teplotní závislost ztrátového činitele vysušeného papíru pro různé frekvence [5]

- upraveno

Z obrázku je patrné, že s rostoucí teplotou a frekvencí se maximum ztrátového činitele posouvá k vyšším hodnotám.

2.6.2 Dielektrické ztráty v kapalných dielektrikách

Ztráty v kapalných dielektrikách závisí na tom, zda je kapalina polární nebo nepolární.

2.6.2.1 Dielektrické ztráty v nepolárních kapalinách

V čistých nepolárních kapalinách se nevyskytují žádné dipólové momenty, které by se mohly polarizovat. Proto se v takových kapalinách uplatňuje jen elektronová bezztrátová polarizace. Ztráty v těchto dielektrikách jsou zastoupené pouze vodivostními ztrátami. Mezi nepolární kapaliny patří benzol nebo určité druhy transformátorových olejů.[5]

2.6.2.2 Dielektrické ztráty v polárních kapalinách

Dipóly v polárních kapalinách se vlivem střídavého elektrického pole otáčejí. V závislosti na viskozitě dielektrika se tyto dipóly otáčejí snadněji nebo obtížněji. Platí, že čím je viskozita kapaliny větší, tím se dipól hůře orientuje. S tím zaniká orientační polarizace a ztráty jsou minimální, způsobené jenom vodivostními polarizacemi. V případě, že

$$\omega\tau \doteq 1 \quad (2.14)$$

kde τ je doba, za kterou dipóly změni svojí polaritu, vykazuje ztrátový činitel svoje maximum.

Mezi polární kapaliny patří pentahloridifenyl (sonol), olejoprykyřičný kompaund.[5]

2.6.3 Dielektrické ztráty v plynných dielektrikách

Jestliže nebude intenzita elektrického pole taková, aby spustila nárazovou ionizaci daného plynu, můžeme takové plynné dielektrikum považovat za ideální a tedy bezztrátové. To je, důvod proč mají normálové kondenzátory plynná dielektrika. Mezi plynná dielektrika patří CO_2 , SF_6 , vzduch, atd..

2.7 Sledované parametry dielektrik

Z pohledu této diplomové práce nás budou zajímat parametry jako **permitivita**, **izolační odpor** (povrchový, objemový), **ztrátový činitel** a závislosti těchto parametrů na různých

vnějších vlivech. Mezi vnější vlivy, které ovlivňují zmíněné parametry, patří především frekvence přiloženého napětí, teplota, u pevných dielektrik pak i přítlačná síla elektrod a vlhkost.

2.7.1 Izolační odpor

U dielektrik rozlišujeme dva druhy izolačního odporu, vnější (povrchový) a vnitřní (objemový) izolační odpor. Vnitřní izolační odpor je dán poměrem stejnosměrného napětí a proudu tekoucím vnitřkem dielektrika mezi dvěma elektrodami. Povrchový odpor je dán poměrem napětí na povrchu dielektrika a proudem, který teče povrchem dielektrika. Celkový izolační odpor je dán poměrem napětí na dielektriku a součtem proudu tekoucím povrchem a objemem dielektrika.[8]

$$R_{iz} = \frac{U}{I_c} (\Omega) \quad (2.15)$$

kde U je napětí na mezi elektrodami a I_c je součet proudu tekoucí povrchem a objemem dielektrika.

Izolační odpor je silně závislý na stupni navlhnutí dielektrika a na teplotě, za které byl izolační odpor měřen. Velký vliv na hodnotu izolačního odporu má i velikost přiloženého napětí a doba, po kterou bylo toto napětí na dané dielektrikum přiloženo.

Aby bylo možné porovnávat izolační odpor jednotlivých dielektrických materiálů, zavedly se pojmy **měrný povrchový odpor** a **měrný objemový odpor**. Tyto měrné hodnoty jsou vztaženy k jednotkovým rozměrům vzorku, proto nejsou výsledné hodnoty závislé na geometrickém tvaru a lze tak mezi sebou jednotlivá dielektrika porovnávat.[8]

V tabulce 2.3 lze nalézt velikosti měrné objemové rezistivity některých dielektrických materiálů.

Tab. 2.3: Měrný objemový odpor některých elektrotechnických dielektrik [8;9]

Materiál	ρ (Ωm)		Materiál	ρ (Ωm)	Materiál	ρ (Ωm)	
PVC	10^9 až 10^{12}	-	PP	10^{16}	Transformátorový olej BTS	-	-
Porcelán	¹⁾ 10^9 až 10^{10}	²⁾ 10^5 až 10^7	PE	10^{11}	Kondenzátorový olej	-	-
Sklo	³⁾ 10^1 až 10^7	²⁾ 10^3 až 10^8	Papír	¹⁾ $5 \cdot 10^6$ až $3 \cdot 10^{11}$	Steatit	¹⁾ 10^9 až 10^{10}	²⁾ 10^8 až 10^9
Vzduch	10^{15}	-	Laminát	-	Mullitová keramika	¹⁾ 10^{10}	²⁾ 10^7 až 10^9

¹⁾ měřeno při 20 °C ²⁾ měřeno při 200 °C ³⁾ měřeno při 300 °C

U neoznačených buněk nebyly v literatuře uvedeny okolnosti měření.

2.7.2 Relativní permitivita

Relativní permitivita charakterizuje polarizační děje uvnitř dielektrika. Je to konstanta úměrnosti mezi vektorem intenzity elektrického pole \vec{E} a vektorem elektrické indukce \vec{D} . [7]

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (2.16)$$

Za určitých podmínek (elektrická pole o nízkých frekvencích) je relativní permitivita definována jako poměr kapacity kondenzátoru, jehož dielektrikum je tvořeno výhradě

měřeným dielektrikem a kondenzátoru, jehož dielektrikum je tvořeno vakuem. Relativní permitivitu lze proto vypočítat podle vztahu

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_o} \quad (-) \quad (2.17)$$

,kde C_x je kapacita kondenzátoru, jehož dielektrikum je tvořeno měřeným materiálem a C_o je kondenzátor stejných rozměrů, jehož dielektrikum je tvořeno vakuem. S dostatečnou přesností lze kapacitu C_o spočítat z kondenzátoru jehož dielektrikum je tvořeno suchým plynem CO_2 ($\varepsilon_{\text{CO}_2}=1,00053$).[6]

V tabulce 2.4 lze nalézt hodnoty permitivity některých dielektrických materiálů používaných v silnoproudé elektrotechnice.

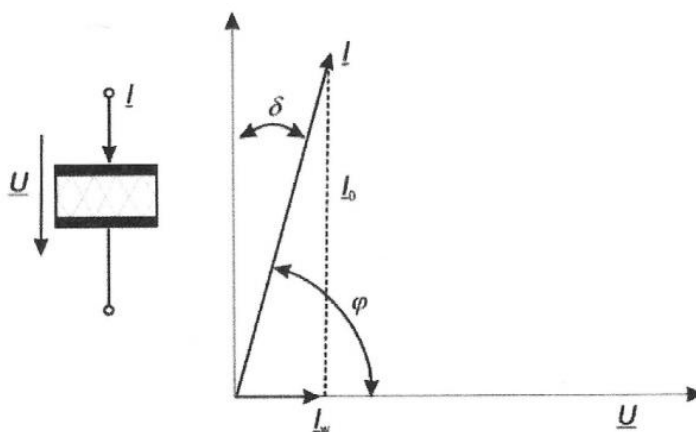
Tab. 2.4: Relativní permitivita některých elektrotechnických dielektrik [7;8;9]

Materiál	ε_r	Materiál	ε_r	Materiál	ε_r
PVC	4 až 8	PP	2 až 2,2	Transformátorový olej BTS	³⁾ 2,1 až 2,4
Porcelán	²⁾ 6	PE	2,16	Kondenzátorový olej	³⁾ 2,1 až 2,25
Sklo	3,7 až 10	Papír	1,6 až 2,6	Steatit	²⁾ 6
Vzduch	1,000594	Laminát	²⁾ 3,5 až 7	Mullitová keramika	²⁾ 6 až 8

¹⁾ měřeno při 1 kHz ²⁾ měřeno při 50 Hz ³⁾ měřeno při 20 °C

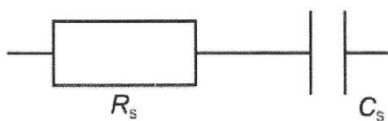
2.7.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je tangens úhlu dielektrických ztrát. Úhel dielektrických ztrát je úhel, který je doplňkem do $\pi/2$ rozdíl mezi fázorem napětí a proudem tekoucím kondenzátorem. Ztrátový činitel nám tedy popisuje velikostní rozdíl mezi reálným a ideálním dielektrikem.[6]



Obr. 2.12: Činitel dielektrických ztrát [6]

Pro popis dielektrických ztrát v technickém kondenzátoru se vzhledem k vnějším obvodům používají ekvivalentní náhradní modely. Tyto modely mohou být tvořeny buďto sériovým nebo paralelním zapojením ideálního odporu a ideálního kondenzátoru. Na obrázku 2.13 lze vidět sériové zapojení náhradního modelu.[6]

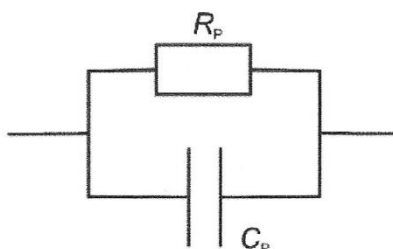


Obr. 2.13: Sériový náhradní obvod [6]

Pro určení velikosti ztrátového činitele z tohoto schématu se používá vztah

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s \quad (-) \quad (2.18)$$

kde C_s je kapacita ideálního kondenzátoru a R_s je hodnota rezistivity ideálního odporu. Obrázek 2.14 zobrazuje schéma zapojení kondenzátoru a rezistoru u náhradního paralelního modelu.



Obr. 2.14: Paralelní náhradní obvod [6]

Velikost ztrátového činitele se v tomto případě vypočte podle vztahu

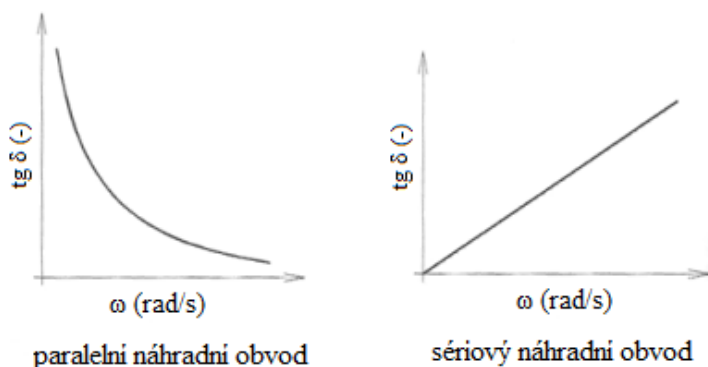
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p} \quad (-) \quad (2.19)$$

kde C_p je kapacita ideálního kondenzátoru a R_p je hodnota rezistivity ideálního odporu. Parametry těchto součástí musí být takové, aby velikost ztrát a fázový posun φ mezi napětím a proudem byly stejné jako ztráty a fázový posun φ v technickém (reálném) dielektriku. Tato podmínka platí i pro sériový náhradní obvod.[6]

Je-li hodnota ztrátového činitele velmi malá, lze považovat obě schémata jako rovnocenná.

Pro výpočet kapacity kondenzátoru se používá paralelní náhradní obvod, a to z důvodu, že $R_p \gg R_s$. [1] Pokud je ale hodnota ztrátového činitele velmi vysoká, pak je rozdíl mezi sériovým a paralelním náhradním modelem značný.

Na obrázku níže je patrný rozdíl mezi sériovým a paralelním náhradním schématem, je zde zobrazena závislost $\operatorname{tg} \delta$ na frekvenci přiloženého napětí při konstantní teplotě.[6]

Obr. 2.15: Závislost $\operatorname{tg} \delta$ na frekvenci pro sériový a paralelní náhradní obvod [1]

Tab. 2.5: Ztrátový činitel pro některá elektrotechnická dielektrika [8;9]

Materiál	tg δ	Materiál	tg δ	Materiál	tg δ
PVC	¹⁾ 0,07 až 0,16	PP	¹⁾ 0,0006	Transformátorový olej BTS	⁴⁾ $150 \cdot 10^{-4}$
Porcelán	²⁾ $170 \cdot 10^{-4}$ až $250 \cdot 10^{-4}$	PE	¹⁾ 0,0003	Kondenzátorový olej	⁴⁾ $12 \cdot 10^{-4}$
Sklo	³⁾ $2 \cdot 10^{-4}$ až $100 \cdot 10^{-4}$	Papír	$61 \cdot 10^{-4}$	Steatit	$20 \cdot 10^{-4}$ až $30 \cdot 10^{-4}$
Vzduch	⁴⁾ 10^{-6}	Laminát	³⁾ 0,01 až 0,5	Mullitová keramika	-

¹⁾ měřeno při 1 kHz ²⁾ měřeno při 20 °C a 50 Hz ³⁾ měřeno při 90 °C a 50 Hz ⁴⁾ měřeno při 20 °C

2.8 Faktory ovlivňující dielektrické parametry

Vlastnosti dielektrik nejsou dané jen povahou dielektrika potažmo jeho složením, ale závisí i na vnějších vlivech, které na dané dielektrikum působí. Vnější vlivy můžou na dielektrika působit dvěma způsoby. Změna intenzity působícího faktoru vyvolá změnu vlastností dielektrika, ale po skončení působení vnějšího faktoru se obnoví původní vlastnosti dielektrika. Tento proces se nazývá **vratná změna**. Druhý způsob jak mohou vnější vlivy působit na dielektrikum, je že v dielektriku vyvolají **nevratné změny**. Nevratné změny jsou téměř vždy změnami k horšímu, proto se nazývají stárnutí.[8]

Mezi hlavní vnější vlivy, které mají vliv na vlastnosti dielektrik, jsou:

- Teplota
- Vlhkost
- Světlo
- Napětí
- Frekvence
- Čas

2.8.1 Teplota

Jestliže je dielektrikum vystaveno vysokým teplotám jeho elektrické vlastnosti se začnou měnit, zhoršovat se. Odpor začne klesat, s čímž je spojen vzrůst dielektrických ztrát (oblast nízkých frekvencí), permitivita vzrůstá a elektrická pevnost dielektrika klesá. U kapalných dielektrik se začne zmenšovat viskozita a zvyšuje se odpařování. Plynná dielektrika vystavená vysokým teplotám zhoršují svoje izolační vlastnosti z důvodu většího pohybu volných částic v objemu dielektrika. Při nízkých teplotách se uvedené procesy dějí opačně.[8]

2.8.2 Vlhkost

Působením vlhkosti - vody se elektrické vlastnosti pevných a kapalných dielektrik v menší nebo větší míře zhoršují. Povrchový a objemový odpor klesá, elektrická pevnost se také snižuje, dielektrické ztráty a permitivita naopak rostou. Účinek vlhkosti na dielektrika má velký vliv z toho důvodu, že relativní permitivita vody je cca 81.

Při styku pevného dielektrika s vlhkým ovzduším se začnou dít dva děje, absorpce vody na povrchu dielektrika a absorpce vody do objemu dielektrika. Příčinou absorpce vody na povrchu dielektrika jsou síly, které působí mezi molekulami vody a dielektrikem.[8]

2.8.3 Světlo

Hlavním zdrojem světla, které působí na dielektrika a způsobuje jejich světelné stárnutí je Slunce. Světelné stárnutí se uvažuje jen u dielektrik vystavených přímému slunečnímu záření. U dielektrik, která nejsou vystavená slunečnému záření, je světelné stárnutí nevýznamné. Výjimkou je ultrafialové záření, které vzniká při výbojích, jeho vliv se musí respektovat. Pohlcená energie záření vyvolává v objemu dielektrika fotochemické reakce, které vyvolávají teplené stárnutí.[8]

2.8.4 Napětí

Zvyšování měřicího napětí má za následek projev nelineárních jevů v dielektriku. Rovněž lze pozorovat závislost nabíjecích proudů na napětí. Napětí v dielektrikách vyvolává nepřímé účinky, mezi které patří částečné výboje, plazivé proudy nebo oblouk. Při zvyšování napětí nad průrazné napětí, dochází k průrazu dielektrika, a tím i k jeho destrukci – tedy k nevratné změně.[6;8]

2.8.5 Frekvence

Relativní permitivita a dielektrické ztráty nejsou konstantou v celém frekvenčním rozsahu, proto je nutné, aby se dielektrika měřila při frekvencích, za kterých budou používána. Hlavní vliv na to má rychlost relaxačních polarizací uvnitř objemu dielektrika. Čím bude frekvence přiloženého napětí větší, tím bude relativní permitivita dielektrického materiálu menší, naopak se zvětšující se frekvencí se koeficient dielektrických ztrát posouvá k vyšším hodnotám.[6]

2.8.6 Čas

Jak bylo popsáno v odstavcích výše, relaxační polarizace jsou časově závislé. Každá relaxační polarizace má svůj čas τ (relaxační doba). Naměřené hodnoty tedy silně závisí na době trvání přiloženého napětí. V technické praxi se měření dielektrických vlastností materiálu provádí 1 minutu po přiložení napětí.[6]

3 MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ

Práce se zabývá měřením vybraných dielektrických parametrů na zařízení od firmy Haefely. Měření se budou provádět na zařízení Tettex 2830/2831, ke kterému lze připojit buňku pro měření pevných dielektrik s označením Tettex 2914 a buňku pro měření kapalných dielektrik s označením Tettex 2903.

Proto následující kapitoly budou zaměřeny na princip činnosti těchto zařízení a nebudou rozebírány další metody měření dielektrických parametrů, které nesouvisí se zařízením od firmy Haefely.

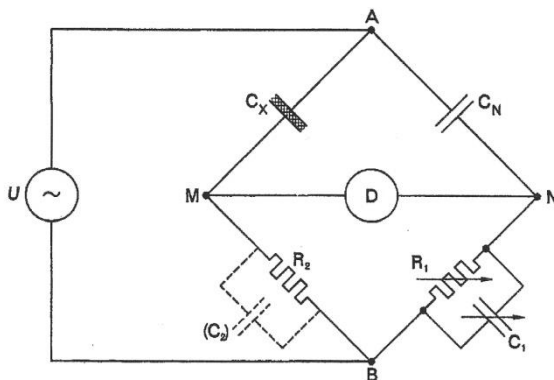
Dále budou popsány vnější vlivy, které ovlivňují měřená dielektrika, způsob přípravy měřicích vzorků a následné zpracování naměřených výsledků a jejich interpretace.

3.1 Funkční principy zařízení Tettex

V následujících odstavcích budou popsány principy měření ztrátového činitele, izolačního odporu a relativní permitivity zařízením Tettex 2830 a Tettex 2840.

3.1.1 Měření ztrátového činitele

Existuje několik metod na měření ztrátového činitele. Ty nejvýznamnější jsou popsány v normě ČSN IEC 250. Mezi nejpoužívanější patří můstková metoda. Můstek je sestaven ze čtyř větví. Tyto větve jsou rozděleny na dvě části, jedna část je vysokonapěťová a druhá je nízkonapěťová, jak je vidět na obrázku.



Obr. 3.1: Schéma zapojení Scheringova můstku [10]

Ve vysokonapěťové části obvodu jsou umístěny dvě kapacity. Kapacita C_n je kapacitní normál, který jako dielektrikum používá stlačený CO_2 a jehož kapacita je cca 100 pF a ztrátový činitel $\text{tg } \delta < 10^{-5}$. [1] Druhý kondenzátor reprezentuje neznámou kapacitu C_x měřeného dielektrika. V nízkonapěťové části obvodu jsou dva rezistory R_1 , R_2 z nichž je alespoň jeden regulovatelný. Rezistor R_1 je zapojen proti neznámé kapacitě měřeného dielektrika. Jestliže si neznámou kapacitu nahradíme sériovým obvodem s kapacitou C_s a odporem R_s , pak vyvážený můstek splňuje podmínky, kde

$$C_s = C_n \frac{R_1}{R_2} \quad (F) \quad (3.1)$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega \cdot C_s \cdot R_s (-) \quad (3.2)$$

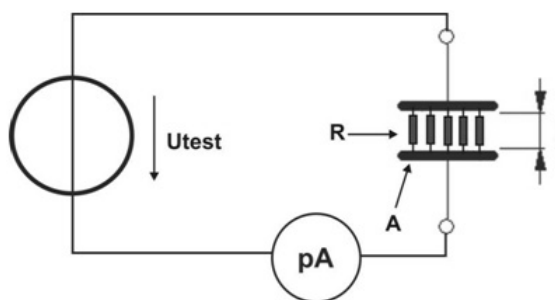
Nízkonapěťová část slouží k vyvažování můstku. Odporovou dekádou R_2 se vyrovnává kapacitní složka náhradního obvodu, kapacitní dekádou C_4 se vyrovnává odporová složka náhradního schématu. Vyrovnání můstku indikuje nulový indikátor. Odporová a kapacitní dekáda jsou plně automatizovány, aby se zamezilo vzniku chyb způsobených lidským faktorem. Realizace můstku se mohou lišit v závislosti na oblasti použití. Hlavní faktor, který na to bude mít vliv, je frekvence, při které bude můstek pracovat. Vychází to z faktu, že kapacita od 50 pF do 1000 pF bude mít impedanci cca od 60 M Ω do 3 M Ω při frekvenci 50 Hz. Jestliže bude frekvence 100 kHz, pak se toto impedanční rozmezí posune do oblasti od 1,5 k Ω o 30 k Ω . [1;10]

3.1.1.1 Princip měření ztrátového činitele pomocí Tettex 2830 a 2840

Zařízení Tettex 2830 a 2840 využívají principu Scheringova můstku. Využívají dvouvektorovou měřicí metodu. Tato metoda je založena na měření proudu I_n , který protéká normálovou kapacitou C_n a na měření proudu I_x , který protéká neznámou kapacitou měřeného dielektrika. Proudů jsou měřeny na odporových dekádách R_x a R_n , které jsou automaticky nastavovány, aby došlo k vybalancování můstku. Měřené proudy jsou digitalizovány v A/D převodníku. Tyto hodnoty jsou následně pomocí datové sběrnice dopraveny do procesní jednotky zařízení, kde jsou dále vyhodnocovány. Tento způsob měření nám dovoluje rychle a přesně měřit požadované parametry včetně fázového posunu mezi proudem I_n a I_x , ze kterého se pak určuje ztrátový činitel. [11]

3.1.2 Měření izolačního odporu

Pro měření izolačního odporu existují dvě metody, přímá a nepřímá. Přímá metoda je založena na měření proudu, který protéká neznámým odporem (dielektrikem), a na znalosti napětí, které je na toto dielektrikum přivedeno (Ohmova metoda). Druhá metoda je založena na porovnávání poměru mezi neznámým odporem a odporem, jehož hodnotu známe. Tyto odpory jsou zapojeny v můstkovém zapojení. Tato metoda využívá Wheatstonův můstek (Metoda Wheatstonova můstku).



Obr. 3.2: Princip měření izolačního odporu [11]

3.1.2.1 Princip měření rezistivity přístroje Tettex 2830 a 2840

Zařízení pro svoji činnost využívá Ohmovu metodu. Zabudovaný pikoampérmetr měří proud protékající přes pevnou nebo kapalnou buňku. Aplikované napětí a protékající proud jsou digitalizovány pomocí A/D převodníku a posílány do procesní jednotky, kde jsou zpracovávány. Aby mohla být vypočtena rezistivita materiálu, musí být známy čtyři parametry - přiložené napětí U_{test} , měřený proud I_x , povrch měřící elektrody A (konstanta) a tloušťka zkušební vzorku l . U pevných dielektrik je tloušťka dána tloušťkou vzorku a u

kapalných dielektrik je tento parametr konstantou, který je dán konstrukcí buňky (2 mm – vzdálenost elektrod).[11]

3.1.3 Měření relativní permitivity

Zařízení relativní permitivitu měřeného dielektrika měří nepřímo. Změří tedy jeho kapacitu pomocí Scheringova můstku, ze které následně pomocí vztahu 2.17 vypočte relativní permitivitu.

3.2 Měřicí zařízení Tettex

Měření se budou provádět na zařízeních Tettex 2840 a Tettex 2830/2831 s možností připojení buněk Tettex 2903 a 2914.

3.2.1 Tettex 2830/2831, Tettex 2840

Měřicí zařízení Tettex 2830 a 2840 jsou naprosto totožná, proto budou popsána v rámci jedné kapitoly.

Měřicí zařízení se skládá ze zdroje měřicího napětí Tettex 2831 a procesní jednotky Tettex 2830, která vyhodnocuje a zobrazuje naměřená data. Zařízení je schopno měřit izolační materiály s velmi malými dielektrickými ztrátami.

Vnitřní kapacitní normál má kapacitu 1nF $\pm 1\%$ při 25 °C a ztrátový činitel $1 \cdot 10^{-5}$ určený s přesností $\pm 2 \cdot 10^{-5}$. [11]

Zařízení je vybaveno dotykovou obrazovkou s intuitivním ovládáním. V zařízení jsou implementovány postupy měření podle platných norem. V nastavení lze volit mezi ručním a automatickým režimem měření. Zařízení umí měřit, respektive dopočítat až 13 různých parametrů měřeného dielektrika. [11]

Vybraná technická data zařízení Tettex 2830/2831 respektive Tettex 2840 lze nalézt v tabulce 3.1.

Tab. 3.1: Technická data Tettex 2830/2831 a Tettex 2840 [11]

Tettex 2830	Rozsah	Maximální rozlišení	Tettex 2831	Rozsah	Maximální rozlišení
Ztrátový činitel	0 až 100	$1 \cdot 10^{-5}$	AC testovací napětí	40 až 2500 V	1 V
Kapacita	>10 pF	0,001 pF	AC frekvence	40 až 65 Hz	0,1 Hz
Relativní permitivita	1 až 30	$1 \cdot 10^{-3}$	AC proud	5 mA	-
Izolační odpor	120 k Ω až 5 T Ω	1 k Ω	DC testovací napětí	250 až 2500 V	25 V

3.2.2 Tettex 2914

Je to buňka pro měření pevných dielektrik. V podstatě se jedná o vyhřívaný deskový kondenzátor, ve kterém je možno měnit dielektrikum. Vyhřívaná vysokonapěťová elektroda je umístěna v podstavě. Měřicí elektroda je opatřena ochranným prstencem, který eliminuje vliv částečných kapacit. Tato elektroda je namontována na posuvné podpěře, kterou je možno vertikálně posouvat. Posun je zajištěn pomocí hydraulického systému, který umožňuje nastavování přítlačného tlaku elektrod. Z testovací buňky lze pomocí přípojek odčerpávat vzduch. [12]



Obr. 3.3: Buňka pro pevná dielektrika [12]

Tab. 3.2: Vybrané technické parametry buňky pro pevná dielektrika [12]

Tettex 2914	
Povrch elektrod	20 cm ²
Průměr elektrod	49,5 mm
Materiál elektrod	kalená nerezová ocel
Vakuum	3.10 ⁻⁴ mbar
Přítlačná síla	0 až 10 N/cm ²
Maximální teplota	250 °C

3.2.3 Tettex 2903

Tato buňka umožňuje měřit kapalná dielektrika, jako je transformátorový olej. Buňka je uspořádaná jako válcový kondenzátor, který má stíněnou měřicí elektrodu kvůli zabránění rozptylových kapacit. Vysokonapěťová elektroda je vnější obálka válce a měřicí elektroda se stínicí elektrodou jsou uvnitř. Buňka je hermeticky uzavřena pomocí těsnícího kroužku a lze z ní odčerpat vzduch, nebo je naopak možné ji natlačit požadovaným pracovním plynem.[13]

Tab. 3.3: Vybrané technické parametry buňky pro kapalná dielektrika [13]

Tettex 2903	
Kapacita prázdné buňky	cca 60 pF
Vzdálenost mezi elektrodami	2 mm
Objem buňky	40 ml
Plocha elektrod	0,0134 m ²
Materiál elektrod	nerezová ocel



Obr. 3.4: Buňka pro kapalná dielektrika [13]

3.3 Příprava vzorků

Geometrický tvar vzorku má nemalý vliv na přesnost výsledků měření, proto se v následujících odstavcích budeme věnovat tomu, jaký tvar by vzorek měl mít a v případě měření dielektrických kapalin jak by měla vypadat měřící cela.

3.3.1 Pevná dielektrika

Pro měření permitivity a ztrátového činitele je nejvhodnější geometrický tvar vzorku vyrobený z desky. Pro dostatečně velkou přesnost měření je potřeba aby měl vzorek dostatečně velkou tloušťku. Aby byla přesnost měření $\pm 1\%$, musí mít vzorek tloušťku 1,5 mm. Pro dosažení větších přesností je nezbytné, aby tloušťka vzorků byla od 6 mm do 12 mm. Měření tloušťky vzorků se provádí systematicky v bodech rovnoměrně rozdělených po ploše vzorku. Naměřené hodnoty se od průměrné hodnoty nesmí lišit o $\pm 1\%$. Plocha vzorku musí být taková, aby bylo možné s dostatečnou přesností změřit kapacitu měřeného vzorku.[10]

Pokud se měří nízké hodnoty ztrátového činitele, je nutné, aby součin odporu a měřené kapacity byl co nejmenší, a také aby poměr mezi měřenou kapacitou a celkovou kapacitou obvodu byl co největší. Toho docílíme vhodnou konstrukcí připojovacích konektorů a vzorků s malou kapacitou. Další podmínka vyžaduje co nejmenší celkovou kapacitu větve můstku, kde je zapojeno měřené dielektrikum, jelikož je kapacita normálu pevně daná je nutné zajistit co nejmenší kapacitu měřeného vzorku. Jelikož tyto dvě požadavky jdou proti sobě, je nutné volit kompromis. Volíme tedy vzorek s kapacitou přibližně 20 pF a celková kapacita obvodu nesmí být větší než 5 pF.[10]

3.3.2 Kapalná dielektrika

Jelikož se jedná o kapaliny, nelze jejich tvar nijak před měřením upravit. Proto se klade velký důraz na tvar a vlastnosti měřící nádoby.

Vlastností, které by měla měřící buňka pro kapalná dielektrika mít, jsou:[10]

- snadná údržba
- měnění měřící kapaliny bez nutnosti měnit vzájemnou polohu elektrod
- neinterakce mezi měřeným dielektrikem a stěnou nádoby
- snadná regulace teploty uvnitř nádoby
- izolovaný držák elektrod nesmí být ponořen do měřené kapaliny
- nesmí mít ostré okraje

- dostatečně velké mezery, aby nedocházelo k zvedání kapaliny vlivem kapilárních sil

Mezi další důležité aspekty při měření kapalných dielektrik patří způsob jejich odebírání ze stroje. Způsob odebírání má podstatný vliv na vzorek. Při neodborném odebrání vzorku může být vzorek znehodnocen, a tedy výsledky získané z takového vzorku by nepodávaly reálný pohled na to, v jakém stavu je zbytek dielektrické kapaliny uvnitř stroje.

Abychom zabránili znehodnocení vzorku během odebírání, případně během přepravy, je nutno dodržet určité zásady odebírání. Olej je potřeba odebírat z teplého stroje. Nutné je také měřit teplotu odebíraného oleje. Podle teploty vzorku lze přibližně určit procento navlhnutí izolace uvnitř stroje. Odběrné místo na stroji musí být před odběrem řádně očištěno. Je nutné dbát na čistotu všech pomůcek, které budou během odebírání použity, aby nedošlo ke kontaminaci vzorku. Potrubí použité k odběru musí před samotným odběrem být propláchnuté odebíraným olejem v celém rozsahu. Objem proplachovacího oleje má být přibližně 1 litr, nebo 3 až 5-ti násobek objemu vzorku. Důležité je také odebrat vzorek z pracovního prostoru stroje a ne usazenou část oleje. Láhve na vzorek musí také být řádně vyčištěny a vysušeny. Při napouštění oleje je nutné dbát na to, aby olej nepěnil. Láhve se naplňují po zátku. Vzorek je nutné odebírat **bez přístupu vzduchu**, aby nedocházelo ke kontaminaci vzorku vzdušnou vlhkostí. Vzorek mohou také poškodit vnější vlivy jako slunečné záření, střídání teplot a čas přepravy. Proto je odebraný vzorek nutné analyzovat co nejdříve (2 až 4 dny od odebrání).[39]

3.4 Kondicionování

Vzhledem k tomu, že měřené parametry dielektrik závisí od podmínek během měření, je třeba tyto podmínky zaznamenat a uvádět je spolu s naměřenými hodnotami, jinak by naměřené hodnoty neměly vypovídající hodnotu. Referenční prostředí je definováno třemi hlavními parametry, teplotou 20 °C, vlhkostí 65 % a tlakem 1013 mbar.[1] Těmito parametry je definováno normální porovnávací prostředí. Jelikož je ale velice obtížné dodržet tyto parametry přesně, připouští se určitá tolerance, pro teplotu je to ± 2 °C pro vlhkost ± 5 %.[8]

Jestliže se měřený vzorek dielektrika před měřením nacházel v prostředí, které není shodné s prostředím, ve kterém bude probíhat měření je nutno daný vzorek kondicionovat. Stav daného vzorku se nemění okamžitě, ale probíhá v něm určitý přechodný děj, během kterého se teplota a vlhkost přizpůsobují referenční nebo jiné zkušební atmosféře. Čas kondicionování jednotlivých materiálů je různý. Závisí na druhu materiálu, ale také na jeho tloušťce. Jelikož ale ne vždy je možné kondicionovat materiály až do stavu úplného vyrovnání, volí se určité konvekční časy kondicionování, které jsou dané normou.[8]

3.5 Metodika měření

V následujících odstavcích budou popsány postupy uvedené v příslušných normách pro měření jednotlivých sledovaných dielektrických parametrů.

3.5.1 Pevná dielektrika

Měření sledovaných parametrů pevných dielektrik upravuje norma ČSN IEC 93 a norma ČSN IEC 250. Před započítím měření dielektrických parametrů je nutné změřit tloušťku dielektrika. Podrobnosti k měření tloušťky vzorků jsou popsány v odstavci 3.3.1.

3.5.1.1 Měření rezistivity

Měření rezistivity pevných dielektrických materiálů je definováno normou ČSN IEC 93. Norma ČSN IEC 93 uvádí, že zdroj napětí musí být velmi stabilní. Pod velmi stabilním se myslí to, že změna proudu způsobená změnou napětí by byla proti měřenému proudu

zanedbatelná. Jako měřicí napětí norma připouští tyto hodnoty 100; 250; 500; 1 000; 2 500; 5 000; 10 000; 15 000 V. Časy používané pro měření izolačního odporu, které norma uvádí, jsou 1; 2; 10; 50; 100 minut.[38]

Jelikož zařízení Tettex měří vnitřní rezistivitu daného vzorku, je nutné získaná data přepočítat na odpor pomocí vztahu, který uvádí norma ČSN IEC 93.

Pro objemový odpor má tento vztah tvar

$$R_v = \frac{\rho}{A/h} (\Omega) \quad (3.1)$$

kde R_v je vnitřní odpor měřeného dielektrika, ρ je měřená rezistivita, h je tloušťka vzorku v metrech a A je konstanta pro uspořádání měřících elektrod. Pro buňku 2914 má tato konstanta hodnotu $0,002 \text{ m}^2$. [12]

Měření objemové rezistivity izolace kabelů se provádí před jakoukoli další elektrickou zkouškou, která se bude na vzorku kabelu provádět. Před zahájením měření je nutné odstranit všechny vnější vrstvy a žíly musí být před zkouškou ponořené ve vodě minimálně 1 hodinu. Pro měření se používá SS napětí v rozmezí 80 až 500 V. Napětí musí být aplikováno ne méně než 1 minutu a ne více než 5 minut. Měření se provádí mezi každým jádrem a vodou.[46]

3.5.1.2 Měření ztrátového činitele

Norma ČSN IEC 250 uvádí, že měření ztrátového činitele se provádí s v souladu s použitou metodou (zařízení Tettex používá Scheringův můstek) a s doporučeními výrobce měřicího přístroje.[10]

Měření ztrátového činitele kabelů o jmenovitém napětí 6/10 kV nebo vyšším je popsáno v normě ČSN IEC 60502-2. Tato norma uvádí, že ztrátový činitel kabelu se musí měřit napětím alespoň 2 kV při předem definované teplotě jádra kabelu. Kabel se musí ohřívat na požadovanou teplotu jedním ze způsobů, které definuje norma.[46]

3.5.2 Kapalná dielektrika

Měření sledovaných parametrů kapalných dielektrik upravuje norma ČSN EN 60247.

Celu pro měření kapalných dielektrik je nutné plnit tak, aby se zabránilo zachytávání vzduchových bublinek. Následně se cela i s obsahem ohřeje na požadovanou teplotu. Měření je nutné začít do 10 minut od dosažení požadované teploty v rozsahu $\pm 1^\circ\text{C}$. Měření teploty musí být provedeno s rozlišením $0,25^\circ\text{C}$. [45]

3.5.2.1 Měření rezistivity

Zkušební napětí musí mít takovou hodnotu, aby na kapalinu působilo napěťové namáhání rovné 250 V/mm, nebo může být použito jiné napětí, pokud to vyžadují zvláštní postupy. Doba, po kterou má být vzorek vystaven elektrickému namáhání je $60 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$. Použití jiného času může mít za následek významné ovlivnění výsledku. Před započítáním měření je nutné elektrody zkratovat po dobu 60 sekund a měření je nutné zahájit ihned poté.[45]

3.5.2.2 Měření ztrátového činitele

Napětí při měření ztrátového činitele musí vystavit kapalinu napět'ovému namáhání, které je v rozmezí 0,03 kV/mm až 1 kV/mm. Napětí musí být sinusového charakteru a musí mít frekvenci v rozsahu 40 až 62 Hz.[45]

3.6 Zpracování výsledků

Měření se vždy dělají za účelem zjištění stavu měřeného dielektrika. Abychom dostali korektní informace o stavu dielektrika, nestačí hodnoty jen správně změřit, ale také je důležité je správně použít a vyvozovat z nich správné závěry.

Přesnost, se kterou je možné stanovit skutečnou hodnotu měřené veličiny, je zatížená chybami, se kterými musíme počítat při každém měření. Náhodné chyby způsobují to, že při opakování měření nedostaneme stejné výsledky jako při prvním měření, ale výsledky, které se od této hodnoty liší. Jelikož je nemožné zjistit velikost náhodné chyby, nemůžeme ani zjistit přesnou hodnotu měřené veličiny. Proto se udává pouze nejpravděpodobnější hodnota měřené veličiny, která se spočítá jako aritmetický průměr všech naměřených hodnot.[8]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.2)$$

Směrodatná odchylka se vypočte podle vztahu

$$\delta_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.3)$$

kde n je počet měření, a x_i jsou měřené hodnoty.

Naměřené hodnoty se pak zapisují ve tvaru

$$\bar{x} \pm \delta_{\bar{x}} \quad (3.4)$$

V takto vypočteném intervalu hodnot leží skutečná hodnota s pravděpodobností 0,68, tedy skoro 75%. K takto získaným hodnotám je důležité také uvést podmínky měření. Tedy jakým napětím byl daný vzorek namáhán, jakou teplotu při měření měl a jaká frekvence měřícího napětí byla použita. Lze také uvést další parametry měření jako přítlačná síla, relativní vlhkost apod.

4 DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY

V následující kapitole budou rozebrány jednotlivé dielektrické materiály, které se používají v silnoproudé elektroenergetice.

Mezi plynná dielektrika používaná v energetice patří Hexafluorid síry (SF_6), další známé plynné dielektrikum je oxid uhličitý (CO_2). Do plynných dielektrik lze také zařadit vzduch, který lze považovat za nejrozšířenější dielektrikum používané v elektroenergetice, jelikož každá rozvodna a každé venkovní vedení používá vzduch jako izolační médium. Mezi kapalná dielektrika patří minerální oleje, které se používají jako dielektrikum ve výkonových transformátorech. Dalšími známými kapalnými dielektriky jsou silikonové oleje, které v poslední době začínají nahrazovat minerální oleje ve výkonových transformátorech z důvodu šetrnosti k přírodě, nebo různé estery používané například jako dielektrikum ve vysokofrekvenčních kondenzátorech.

Nejrozšířenější skupinou jsou pevná dielektrika. Do této skupiny lze zařadit materiály jako sklo, keramika, epoxidy, kompozity, papír, kaučuk, zesíťovaný polyetylén (XLPE), polyetylén (PE), polypropylén (PP) a polyvinylchlorid (PVC) a další. Většina z těchto materiálů se používá jako izolace kabelů všech napěťových úrovní.

4.1 Plynná dielektrika

Plynná dielektrika jsou považována za nejlepší. Jejich vlastnosti jsou v čase stálé, nepodléhají stárnutí a po průrazu obnoví svojí elektrickou pevnost na počáteční hodnotu. Spolu s kapalnými dielektriky jsou jako jediné schopné rovnoměrně vyplnit celý objem prostředí, ve kterém se nachází. Mezi plynná dielektrika patří vzduch, oxid uhličitý (CO_2), hexafluorid síry (SF_6) a dusík (N_2).[8]

4.1.1 Oxid uhličitý CO_2

Oxid uhličitý se používá jako plynné dielektrikum v normálových kondenzátorech. Jedná se o bezbarvý plyn, který vzniká reakcí uhlíku a kyslíku (spalováním). Relativní elektrická pevnost v poměru se vzduchem je 0,9 a bod zkapalnění je $-78,5\text{ }^\circ\text{C}$. [8]

4.1.2 Vzduch

Jedná se o nejrozšířenější dielektrikum používané v elektroenergetice. Ve venkovních rozvodnách a vedeních slouží jako izolace mezi jednotlivými fázemi a mezi fází a zemí. Vzduch je směs několika různých plynů, mezi které patří ze 78,09 % Dusík, Kyslík je zastoupen z 20,95 % a zbytek tvoří jiné plyny, jako jsou neon, hélium, metan, vodík, oxid uhličitý, krypton a xenon.

Relativní permitivita vzduchu je 1,000594 a ztrátový činitel 10^{-6} . Údaje jsou uvedeny pro vzduch o teplotě $20\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 100 kPa.[8]

4.1.3 Hexafluorid síry SF_6

Jedná se o elektronegativní plyn, který se používá jako dielektrikum ve výkonových vypínačích nebo v zapouzdřených rozvodnách. Jeho molekuly na sebe vážou volné elektrony, a tím vytvářejí těžší ionty s nízkou pohyblivostí. To způsobuje, že vytvoření elektronových lavin je velmi obtížné. Elektrická pevnost SF_6 je přibližně tři krát větší než elektrická pevnost vzduchu. Díky nízké disociační teplotě a vysoké disociační energii má SF_6 vynikající vlastnosti pro zhasnutí elektrického oblouku. Oblouk vytvořený v SF_6 zůstává vodivý i do relativně nízkých teplot oblouku, to má za následek minimalizaci možnosti přerušení oblouku

před průchodem proudem nulou, a tím pádem nedochází k zatěžování sítě velkým přepětím. Relativní permitivita SF₆ při 25 °C a atmosférickém tlaku je 1,00204. Ztrátový činitel při stejných podmínkách je $< 2 \cdot 10^{-7}$. [40]

Oproti vzduchu má 2,5 krát větší elektrickou pevnost a je 5 krát těžší než vzduch. Jedná se o nejstabilnější technický plyn, což má za následek, že je 23 500 krát lepší skleníkový plyn než oxid uhličitý. Proto je snaha tento plyn nahrazovat jinými, které tolik nezatěžují planetu.

Ve studii [15] je uvedeno, že pokud použijeme kombinaci SF₆ a N₂ v poměru 4 díly SF₆ a 6 dílů N₂, tak dojde jen k malému poklesu elektrické pevnosti výsledné směsi v porovnání s čistým SF₆. Dalším významným faktorem je cena, SF₆ je drahý plyn, naproti tomu N₂ je levný a lehce dostupný. Z toho plyne, že z ekonomických a ekologických důvodů je lepší používat směsi plynů než samotný plyn SF₆.

4.1.4 Dusík N₂

Jelikož je dusík zastoupen ze 78,09 % ve vzduchu, jsou jeho vlastnosti téměř podobné jako vlastnosti vzduchu s tím rozdílem, že dusík je inertní plyn. Z tohoto důvodu se používá jako inertní atmosféra uvnitř výkonových transformátorů, aby nedocházelo k degradaci jeho olejové náplně vlivem vzdušné vlhkosti obsažené ve vzduchu.

4.2 Kapalná dielektrika

Kapalná dielektrika lze rozdělit do dvou skupin podle jejich původu, a to na přírodní a na syntetická. Mezi přírodní řadíme minerální oleje a přírodní estery. Do syntetických olejů řadíme silikonové oleje, polybuteny, chlorované uhlovodíky a syntetické estery. [16]

Kapalná dielektrika jsou využívána ve výkonových transformátorech, kde jednak zastávají roli izolačního ale také chladicího média. Také jsou používána jako součást izolace kabelů, kde slouží jako impregnace papírového dielektrika, nebo jako dielektrika v kondenzátorech. Lze je také nalézt ve výkonových vypínačích, kde plní funkci zhášecího média.

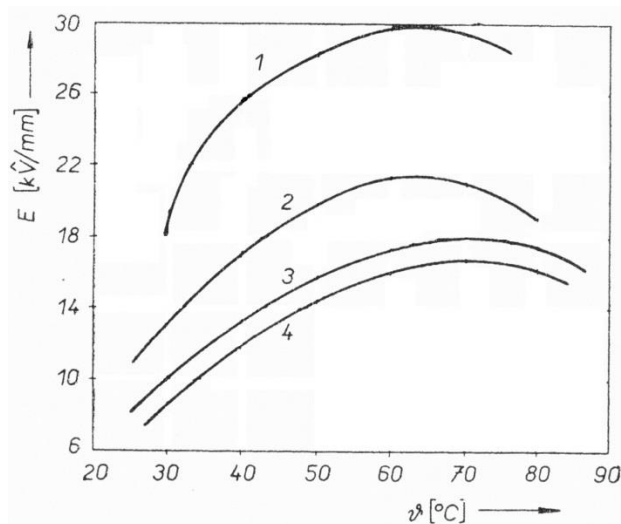
4.2.1 Minerální oleje

Jedná se o nejrozšířenější kapalné dielektrikum, je to z důvodu výborných dielektrických vlastností a nízké pořizovací ceně. Používají se hlavně ve výkonových transformátorech, ve kterých jak už bylo napsáno výše, zastávají roli dielektrika ale hlavně také roli chladicího média. Minerální oleje se získávají pomocí destilace ropy. Tyto oleje jsou mixem různých uhlovodíků, které jsou obsaženy v surové ropě. Tyto uhlovodíky lze rozdělit na:

- parafinická, obsahují přes 66% nasycených parafinických uhlovodíků
- naftenická obsahují přes 66% nasycených naftenických uhlovodíků
- aromatická, která obsahují nenasycené uhlovodíky

Pro potřeby elektroenergetiky jsou nejvhodnější oleje, které obsahují nasycené uhlovodíky. Oleje, které jsou používány v elektroenergetice, lze rozdělit do tří skupin, **transformátorové oleje, kabelové oleje a kondenzátorové oleje.**

Požadavky kladené na transformátorové oleje vyplývají z jejich oblasti použití. Aby byl zajištěn dobrý odvod tepla, je nutné, aby olej měl co nejnižší viskozitu. Z pohledu izolačních vlastností je potřeba aby olej měl dostatečnou elektrickou pevnost i během působení provozních činitelů. Velký vliv na to má obsah vody v oleji.



Obr. 4.1: Závislost elektrické pevnosti na obsahu vody v oleji [8] - upraveno

obsah vody cca: ¹⁾ 0,002 %, ²⁾ 0,01 %, ³⁾ 0,05 %, ⁴⁾ 0,1 %

Z obrázku je patrné, že i malé množství vody má podstatný vliv na elektrickou pevnost transformátorového oleje. Další aspekt, který má za následek degradaci oleje, jsou produkty oxidace. Tyto produkty jsou ve formě kalu, který se usazuje na vinutí transformátoru a zhoršuje odvod tepla. Tyto produkty jsou polárního charakteru, mají za následek zhoršení elektrických vlastností oleje, které lze pozorovat na změně ztrátového činitele. Mezi nevýhody minerálního oleje patří to, že je ekologicky náročný na likvidaci, je vysoce hořlavý a výbušný. Minerální oleje hůře pohlcují vlhkost z celulózových izolací uvnitř transformátorů, to má za následek rychlejší degradaci vnitřní izolace, a tím i celkovou životnost transformátorů. Proto se vede intenzivní výzkum k nalezení optimální dielektrické kapaliny, která by mohla minerální oleje nahradit.[8]

Parametry minerálního oleje při 20 °C, jak uvádí literatura, [8] jsou ztrátový činitel $150 \cdot 10^{-4}$ a relativní permitivita 2,1 až 2,4. Vodivost minerálního oleje při 25 °C je 10^{-14} S/cm, při 100 °C je to přibližně 10^{-13} S/cm.[23] Norma ČSN EN 60422 ed.2 uvádí, že parametry nového oleje po naplnění do nového elektrického zařízení před uvedením do provozu pro zařízení do 170 kV jmenovitého napětí jsou, ztrátový činitel max. 0,015 při 90 °C a frekvenci 40 až 60 Hz. Rezistivita má být podle normy minimálně 60 GΩm. Pro zařízení nad 170 kV má mít ztrátový činitel hodnotu maximálně 0,01 při stejných podmínkách. Rezistivita je stejná jako při zařízeních do 170 kV.[44]

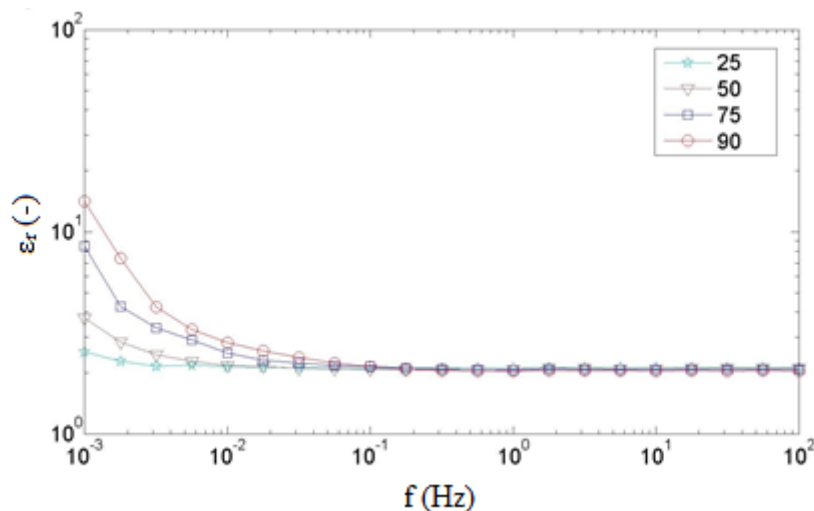
Norma dále uvádí, jaké jsou přípustné limitní hodnoty pro minerální oleje v provozu. Norma rozlišuje tři stavy izolačních olejů. A to **dobrý**, kdy je olej v normálním stavu a není třeba měnit četnost rutinních odběrů vzorků. Druhý stav je **vyhovující**, kdy je na oleji znatelné stárnutí, tady norma doporučuje zvýšit četnost rutinních odběrů. Třetí stav oleje, který norma definuje, je **nevyhovující**. Stárnutí oleje v tomto stavu je abnormální a je nutné provést okamžitá nápravná opatření.[44] V tabulce 4.1 jsou uvedeny limitní hodnoty vybraných parametrů minerálního oleje pro jednotlivé stavy, které definuje norma.

Tab. 4.1: Limitní hodnoty vybraných parametrů minerálních olejů [44]

Zařízení	Limity								
	Dobry			Vyhovující			Nevyhovující		
	tg δ při 90 °C, 40 až 60 Hz	ρ (G Ω m)		tg δ při 90 °C, 40 až 60 Hz	ρ (G Ω m)		tg δ při 90 °C, 40 až 60 Hz	ρ (G Ω m)	
		20 °C	90 °C		20 °C	90 °C		20 °C	90 °C
Výkonové transformátory do 170 kV	< 0,1	> 200	> 10	0,1 až 0,2	20 až 200	3 až 10	> 0,2	< 20	< 3
Výkonové transformátory nad 170 kV	< 0,1	> 60	> 3	0,1 až 0,5	4 až 60	0,2 až 3	> 0,5	< 4	< 0,2
Přístrojové transformátory nad 170 kV	< 0,01	> 800	> 50	0,01 až 0,03	250 až 800	10 až 50	> 0,03	< 250	< 10
Přístrojové transformátory do 170 kV	< 0,1	> 60	> 3	0,1 až 0,3	7 až 60	0,4 až 3	> 0,3	< 7	< 0,4

Jak popisuje publikace, [17] vliv teploty na parametry minerálního oleje je takový, že ztrátový činitel s rostoucí teplotou roste, zatímco relativní permitivita klesá. Jelikož se v posledních letech v síti objevuje vysokofrekvenční rušení, je důležité znát vliv frekvence na parametry minerálních olejů.

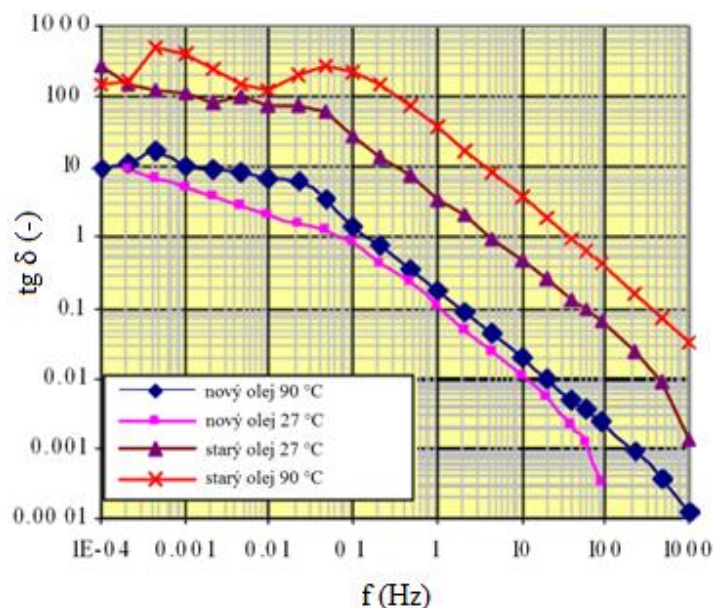
Publikace [18] studovala vliv frekvence na minerální olej. V článku je zkoumán vliv velikosti mezery mezi elektrodami na měřené parametry. Z výsledků experimentu vyplynulo, že relativní permitivita pro vyšší frekvence (od 0,5 Hz) je konstantní a totožná pro obě mezery. Pod 0,5 Hz začíná být znatelná závislost relativní permitivity na frekvenci. Čím je frekvence nižší, tím je relativní permitivita vyšší. Pod frekvenci 0,5 Hz je také znatelný vliv velikosti mezery na velikost relativní permitivity. Zatímco u mezery o velikosti 0,6 mm je znatelný strmější nárůst, pro mezeru 0,12 mm je nárůst relativní permitivity pozvolný.



Obr. 4.2: Závislost relativní permitivity na frekvenci přiloženého napětí pro velikost mezery 0,6 mm [18]

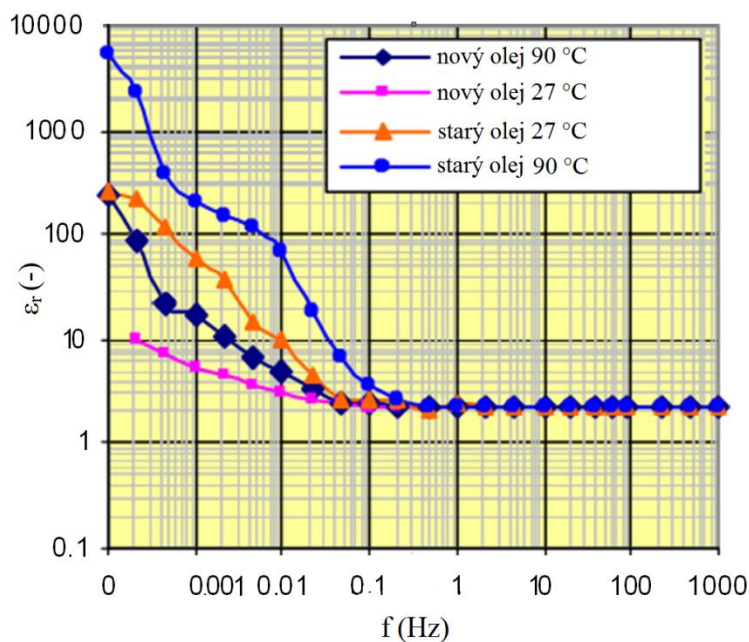
Na obrázku 4.1 je znázorněna závislost relativní permitivity na frekvenci přiloženého napětí pro různé teploty oleje. Z charakteristiky lze vidět strmý nárůst hodnot relativní permitivity od frekvence přibližně 0,01 Hz diskutovaný v předchozím odstavci.

Publikace [19] popisuje vliv frekvence na ztrátový činitel minerálního oleje. Z provedeného experimentu vychází, že čím je frekvence nižší, tím je vyšší i ztrátový činitel. V rozmezí frekvencí $1 \cdot 10^{-4}$ až 0,1 Hz je závislost ztrátového činitele na frekvenci téměř konstantní, od frekvence 0,1 až do 100 Hz má křivka téměř lineární trend klesání.



Obr. 4.3: Závislost ztrátového činitele na frekvenci [19] - upraveno

Na obrázku je vidět závislost ztrátového činitele minerálního oleje na frekvenci přiloženého napětí. Jsou zde porovnávány dva druhy oleje, nový a starý. Ze získaných závislostí lze vidět, že nový olej má menší ztrátový činitel než olej starý. Tento jev je způsoben degradací oleje různými produkty oxidace a také větší koncentrací vody uvnitř oleje. Publikace dále popisuje vliv frekvence na relativní permitivitu, jejíž závislost je zobrazena na obrázku 4.3.



Obr. 4.4: Závislost frekvence na relativní permitivitě [19] - upraveno

Jak je patrné z obrázku 4.3, naměřené charakteristiky se shodují s charakteristikami na obrázku 4.1 a lze je tedy považovat za věrohodné.

4.2.2 Syntetické oleje

Syntetické oleje vznikly kvůli potřebě nahradit hořlavé, ekologicky závadné minerální oleje. Tyto oleje se vyrábí z nízkomolekulárních uhlovodíků, a díky tomu lze jednoduše ovlivňovat jejich chemické složení, a tedy i jejich výsledné vlastnosti. Syntetické oleje vykazují dobré elektrické vlastnosti, jsou nehořlavé a většina z nich je ekologicky nezávadná, jsou tepelně stálé, lépe odolávají stárnutí, a proto se jeví jako dobrá náhrada za minerální oleje. Nicméně jejich masovému nasazení brání jejich pořizovací cena, která je v porovnání s minerálními oleji značná. Díky tomu, že se syntetické oleje vyrábí pomocí syntézy různých chemických sloučenin, existuje jich značné množství. Nejběžnější jsou popsány v textu níže.[20]

Syntetické oleje lze podle chemického složení rozdělit do několika skupin[21]

- Polybuteny
- Chlorované uhlovodíky
- Fluorokarbonáty
- Silikonové oleje

4.2.2.1 Polybuteny

Jedná se o nepolární kapalinu s velmi dobrými chemickými a elektrickými vlastnostmi. Mezi jejich přednosti patří výborná stabilita i při vysokých teplotách a velká elektrická pevnost (až 180 kV/cm). Relativní permitivita se pohybuje kolem 2.2 a ztrátový činitel 0,008.[16] Vznikají během polymerace butenů.

4.2.2.2 Chlorované uhlovodíky

Připravují se chlоровáním uhlovodíku, což znamená, že atom vodíku je nahrazen atomem chlóru. Chlór dodává výsledné sloučenině její vlastnosti, mezi které patří především nehořlavost. Chlorované uhlovodíky nepodléhají oxidaci ani stárnutí a to ani při větších teplotách. Jistá nevýhoda spočívá v tom, že jsou citlivé na ultrafialové záření, které je obsaženo ve slunečním záření. Mezi další nevýhody patří to, že při výbojích v elektrickém zařízení vzniká chlorovodík, který koroduje kovy a napadá i některé další izolanty. Avšak tento neduh lze odstranit přidáním látek (tetrafenylcín), které vznikající chlorovodík ihned vážou na sebe. Poslední a největší nevýhodou je to, že nevyhovují ekologickým požadavkům, a proto se v dnešní době už nevyrábí a postupně se stahují z oběhu. Mezi chlorované uhlovodíky patří sovol, který má relativní permitivitu při 0 °C a 60 Hz přibližně 5,5 a ztrátový činitel při stejných podmínkách přibližně $400 \cdot 10^{-4}$. Hlavní oblast použití chlorovaných uhlovodíků byla v báňských transformátorech, lokomotivách a všude jinde kde je hořlavé nebo výbušné prostředí.[8;21]

4.2.2.3 Fluorokarbonáty

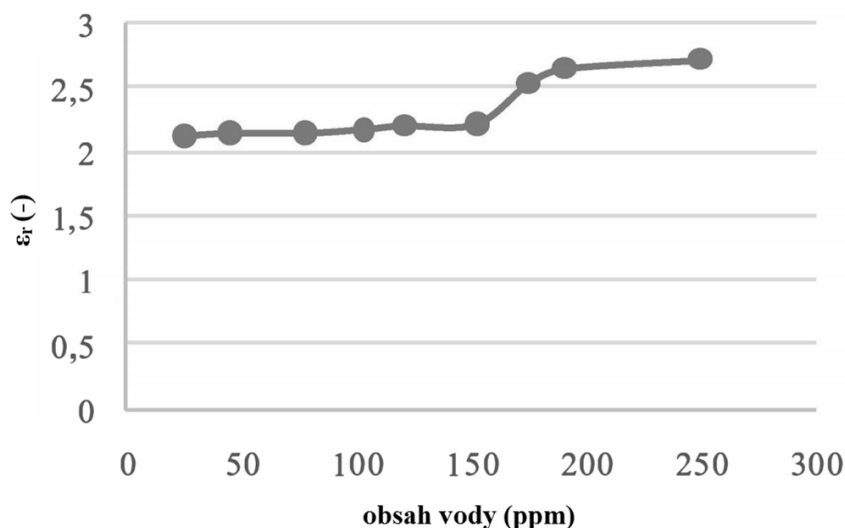
Jsou to nehořlavé a nevýbušné sloučeniny, které vznikají nahrazováním atomu vodíku atomem fluoru. Jedná se o teplotně velmi stálou sloučeninu, která, když v ní není obsažena vlhkost, je inertní vůči kovům a ostatním izolacím vně zařízení. Jistá nevýhoda spočívá v tom, že během výbojů se v nich vytváří produkty, které spolu s vlhkostí korodují kovy a degradují i další izolace uvnitř zařízení a také jsou toxické. Fluorokarbonáty vykazují menší viskozitu než minerální oleje, a proto jsou vhodné jako chladicí médium. Elektrické vlastnosti závisí na molekulové struktuře, většinou vykazují stejné vlastnosti jako minerální oleje. Relativní permitivita se pohybuje od 1,8 až do 6 (pro některé sloučeniny, které se používaly jako dielektrikum ve VF kondenzátorech). Ztrátový činitel je teplotně stálý kolem hodnoty 10^{-4} a měrný izolační odpor je $10^{13} \Omega$. Použití těchto sloučenin je díky jejich vysoké ceně omezeno na radiotechnické transformátory.[8;22]

4.2.2.4 Silikonové oleje

Je to nepolární kapalina známá jako polydimethylsiloxan nebo taky PDMS. Silikonové oleje jsou šetrné k přírodě, jsou nehořlavé, dobře odolávají stárnutí, jsou odolné vůči oxidaci a nepodněcují vznik kalu pod teplotou 160 °C. To má za následek to, že silikonové oleje si uchovávají svoje vlastnosti po dlouhou dobu, i pokud jsou vystavovány vysokým teplotám. Určitou nevýhodou silikonových olejů je to, že nepohlcují plyny jako je vodík, který vzniká při tepelné degradaci. To může mít za následek určité nebezpečí výbuchu. Avšak za posledních 15 let provozu transformátorů se silikonovým olejem nebyl zaznamenán žádný výbuch. Silikonový olej je inertní vůči většině izolačních a vodivých materiálů. Jako určitou nevýhodu lze brát to, že při vysokých teplotách dochází k polymeraci v kontaktu s horkými kovy, což má za následek tvorbu gelu. Tento proces je ale velice zdlouhavý a ani po 3 letech při 150 °C nebyla zjištěna tvorba gelu. Jelikož ale výkonové transformátory nejsou provozovány při takových teplotách, tvorba gelu nehrozí. Silikonový gel je mísitelný s minerálními oleji, to může být výhoda při vyměňování minerálních olejových náplní výkonových transformátorů. Podstatný rozdíl mezi silikonovými a minerálními oleji je to, že silikonové oleje podstatně více absorbují vodu. To má za následek změnu jejich elektrických vlastností.[23]

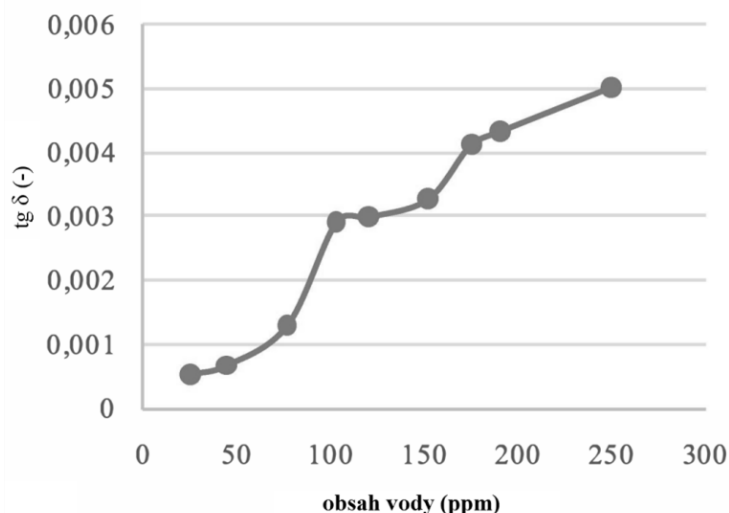
Obecně se vlastnosti silikonového oleje mohou mírně lišit v závislosti na jeho chemickém složení. Proto lze nalézt v literatuře mírně rozdílná data. Literatura [23] uvádí hodnotu, která pro relativní permitivitu při 25 °C a 60 Hz je 2,71 zatímco při 100 °C 2,50. Ztrátový činitel při stejných podmínkách je $8 \cdot 10^{-5}$ pro 25 °C, pro 100 °C je $4 \cdot 10^{-5}$. Vodivost je při 25 °C je 10^{-15} S/cm a při 100 °C je 10^{-14} S/cm.

Publikace [24] pojednává o vlivu vody na elektrické parametry silikonového oleje. Vliv vody na silikonový olej je značný z důvodu, že voda má relativní permitivitu přibližně 81 zatímco silikonový olej, který byl použit v experimentu, přibližně 2,2. Na obrázku 4.5 lze vidět, jak se mění relativní permitivita silikonového oleje se zvětšujícím se obsahem vody.



Obr. 4.5: Závislost relativní permitivity na obsahu vody v silikonovém oleji [24] - upraveno

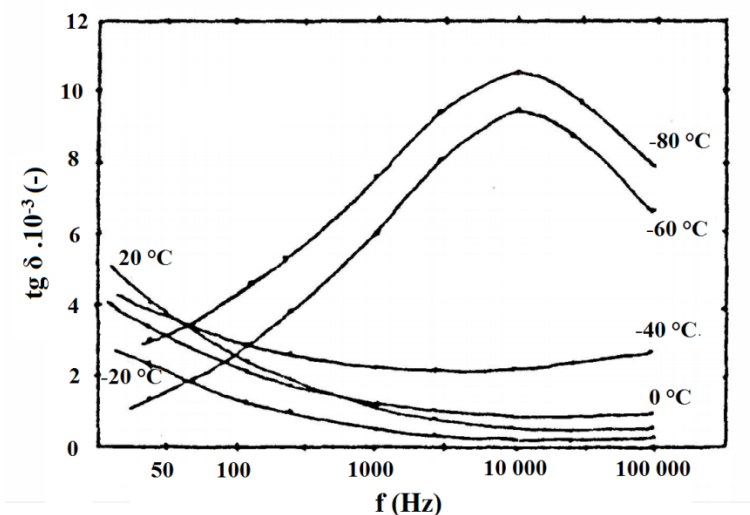
Vliv vody v silikonovém oleji na ztrátový činitel je vidět na obrázku 4.5. Z grafu je patrné, že čím více vody je v silikonovém oleji, tím je ztrátový činitel větší.



Obr. 4.6: Závislost ztrátového činitele na obsahu vody v silikonovém oleji [24] – upraveno

Obsah vody v silikonovém oleji má také vliv na vodivost daného oleje. Čím bude obsah vody větší, tím bude vodivost oleje větší, a tím pádem dojde k poklesu rezistivity.

Publikace [25] se mimo jiné zabývala závislostí ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty silikonového oleje. V experimentu byl použit phenyl methyl silikonový olej. Z výsledků vyplynulo, že je velký rozdíl mezi křivkami závislosti ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty oleje. Křivky pro teplotu oleje pod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazují peak v oblasti 10^4 Hz , zatím co při teplotě oleje nad $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ tento peak chybí. Při teplotě oleje $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ má křivka klesající trend, jak je vidět na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Závislost ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty silikonového oleje [25] - upraveno

4.2.3 Estery

Zvyšující se požadavky na požární bezpečnost a ochranu životního prostředí a delší životnost transformátorů vyžadují hledání alternativy za minerální oleje. To dalo za vznik esterům.

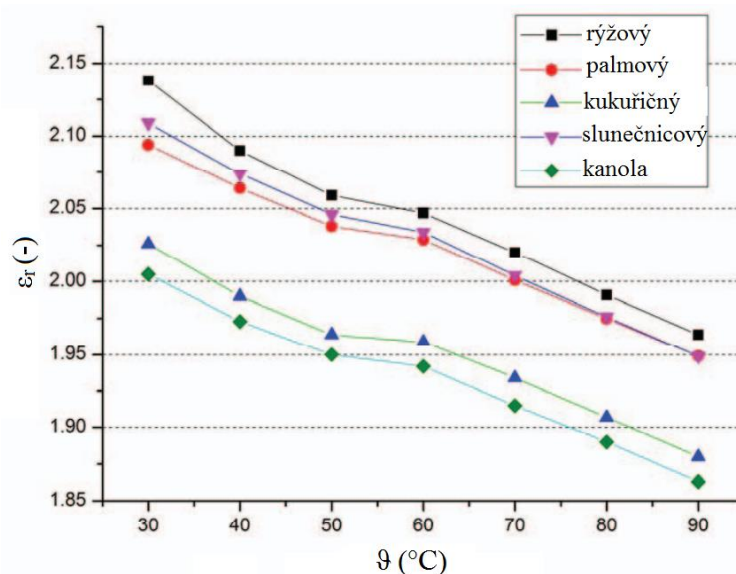
Estery lze rozdělit podle jejich původu na syntetické a přírodní. Syntetický ester se skládá ze čtyř nasycených mastných kyselin připojených k centrální polyolové struktuře. Přírodní estery jsou získávány ze semen rostlin, jako jsou slunečnice, sója, řepka a podobně. Tyto estery mají tři skupiny nasycených mastných kyselin, které jsou připojeny k molekule glycerolu. Vlastnosti přírodních esterů určují právě tyto nasycené mastné kyseliny. Velkou výhodou esterů proti minerálnímu oleji je, že lehce pohlcují vlhkost celulózových dielektrik, použitých uvnitř transformátoru a tím pádem zpomalují degradaci této izolace.[26]

Estery mají dobrou biologickou odbouratelnost a nevytváří žádné toxické produkty. Tyto oleje také odolávají oxidaci. Studie [27] ukázala, že estery jsou vhodné jako náhradní náplň transformátorů, které byly před tím naplněny minerálními oleji. Smícháme-li esterový olej s minerálním olejem a minerálního oleje bude ve výsledné směsi pod 3 %, parametry esterového oleje zůstanou zachovány. Estery vykazují větší viskozitu než minerální oleje, proto je nutné při výměně minerálního oleje za ester zvýšit účinnost chlazení transformátoru.

Relativní permitivita syntetického esteru se pohybuje v rozmezí hodnot 2,8 až 3 při 90 °C, přírodní ester má hodnotu relativní permitivity 2,8 pro tutéž teplotu. Ztrátový činitel syntetického esteru je 0,0006 až 0,001 při 25 °C, 10^{-4} až 0,03 pro 90 °C. Přírodní ester má ztrátový činitel 0,08 při 25°C, při 90 °C je tato hodnota přibližně 0,64. Rezistivita syntetického esteru je 10^{13} Ωm, zatímco hodnota rezistivity pro přírodní ester se pohybuje v rozmezí hodnot 10^{13} až 10^{14} Ωm.[28]

Norma ČSN EN 61099 ed. 2, která specifikuje nepoužité syntetické estery, uvádí, že ztrátový činitel nepoužitého transformátorového esteru má být maximálně 0,03 při 90 °C a 50 Hz. Objemová rezistivita esteru má být minimálně 2 GΩm. Dále jsou v normě uvedeny parametry esterů používaných pro kondenzátory. Norma uvádí, že takový ester má mít relativní permitivitu v rozmezí 4,2 až 4,4 při 90 °C a 50 Hz. Ztrátový činitel má být maximálně 0,03 při 90 °C 50 Hz.[47]

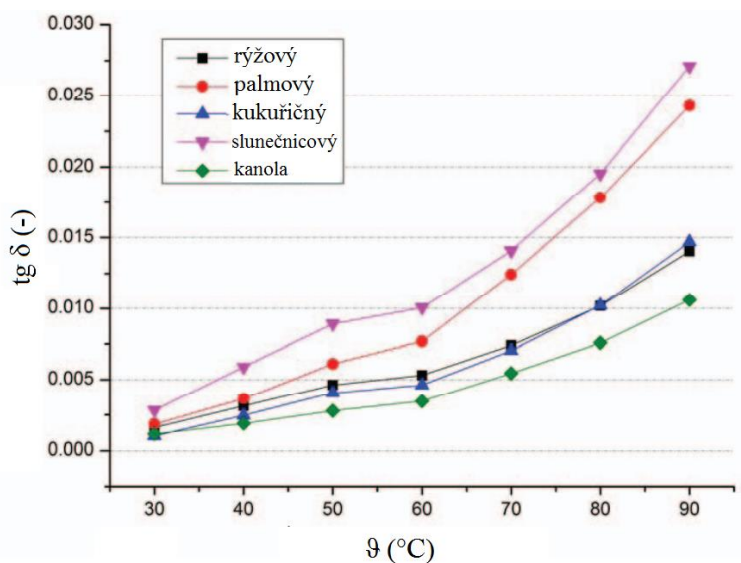
Publikace [29] rozebírá dielektrické vlastnosti přírodních esterů v závislosti na teplotě. Studie zkoumala 5 různých druhů přírodních esterů (olej z rýžových slupek, palmový olej, kukuřiční olej, slunečnicový a kanolový olej) a jejich možné uplatnění místo minerálního oleje ve výkonových transformátorech. Na obrázku 4.8 je možné vidět závislost relativní permitivity přírodních esterů na teplotě.



Obr. 4.8: Závislost relativní permitivity na teplotě pro různé přírodní estery [29] - upraveno

Dále byla ve studii zkoumána závislost ztrátového činitele na teplotě. Obrázek 4.8 zobrazuje tuto závislost, ze které je patrné, že čím je teplota větší, tím je větší i ztrátový činitel. Nejvyšší

ztrátový činitel vykazuje kanola olej. Tento olej má nejnižší ztrátový činitel v celém rozsahu měřených teplot.



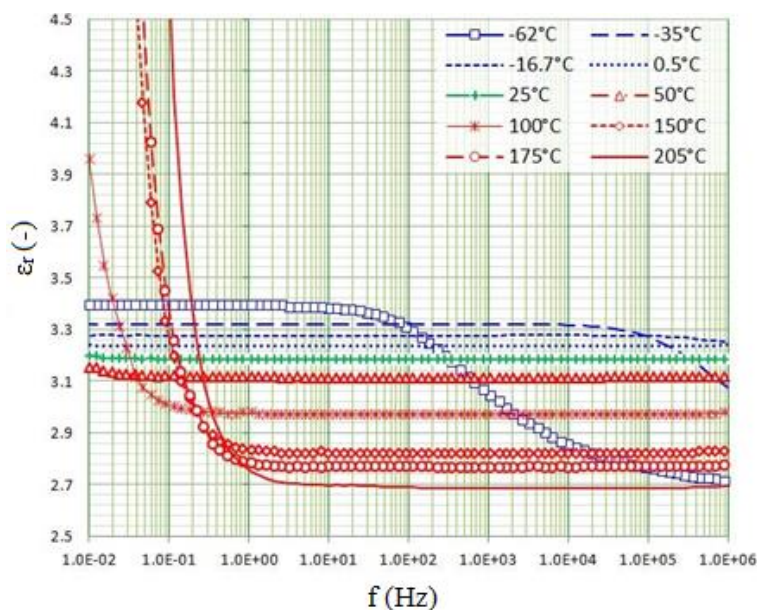
Obr. 4.9: Závislost ztrátového činitele na teplotě pro různé přírodní estery [29] - upraveno

Jako výsledek studie uvádí, že kanola olej je nejvhodnější z testovaných olejů jako náhrada minerálního oleje ve výkonových transformátorech. Je to z důvodu, že má nízký ztrátový činitel a vysokou rezistivitu při vysokých teplotách.

Ve studii [30] se autoři zabývali měřením elektrických parametrů syntetického esteru Midel 7131. Elektrické parametry esteru byly měřeny v rozmezí teplot -60 až 200 °C a ve frekvenčním rozsahu 10 mHz až do 1 MHz.

Relativní permitivita syntetického esteru Midel 7131 je 3,2 [31]. Ztrátový činitel je <0,008 [32].

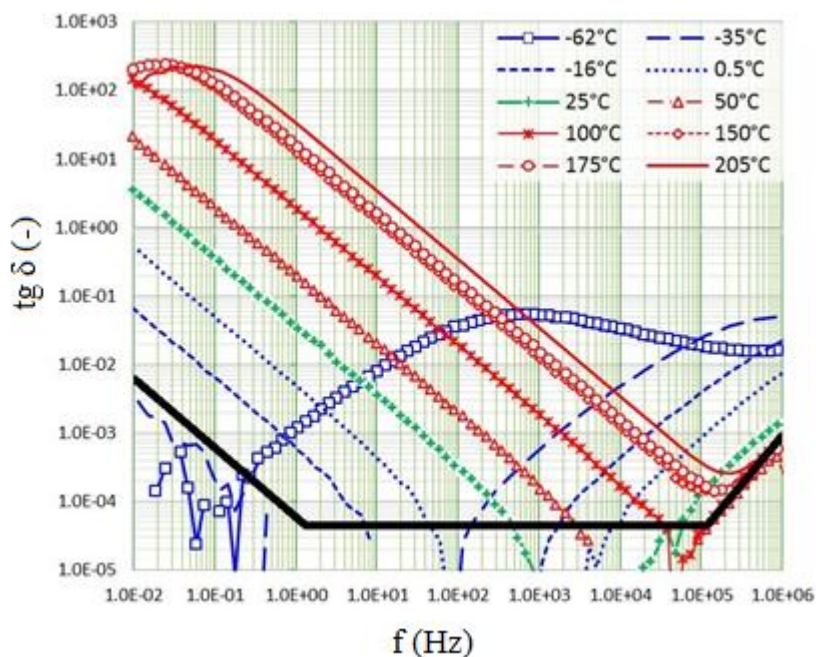
Závislost relativní permitivity na frekvenci pro různé teploty je vidět na obrázku 4.10.



Obr. 4.10: Závislost relativní permitivity syntetického esteru na frekvenci [30]

Ze závislosti je patrné, že v rozmezí teplot -35 až 50 °C je relativní permitivita téměř nezávislá na frekvenci v celém měřeném rozsahu. Při teplotě nad 100 °C je frekvenční nezávislost až od 1 Hz. Pod tuto frekvenci je relativní permitivita exponenciálně závislá na teplotě. Pro teplotu -35 °C je relativní permitivita nezávislá až do 100 kHz, pak má charakteristika klesající trend. Pro teplotu -62 °C platí frekvenční nezávislost jen do 100 Hz, pak má charakteristika klesající trend, který se postupně zmenšuje.

Závislost ztrátového činitele na frekvenci je zobrazena na obrázku 4.11, z něj je vidět, že výsledná charakteristika vykazuje minimum v určitém bodě, které je pro každou teplotu v jiné frekvenční oblasti. Výjimku tvoří závislosti pro teploty nad 150 °C, kde se minimum vyskytuje téměř při stejné frekvenci.



Obr. 4.11: Závislost ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty syntetického esteru [30]

4.3 Pevná dielektrika

Největší skupinou dielektrik jsou dielektrika pevná. Mezi pevná dielektrika používaná v elektroenergetice patří různé keramické materiály jako porcelán nebo steatit. Tyto materiály našly uplatnění jako izolátory na vedeních nebo jako podpěrné izolátory v rozvodnách. Mezi další pevná dielektrika patří sklo, které lze také nalézt v izolátorech. Pevná dielektrika jako polyetylén (PE), polypropylén (PP), polyvinylchlorid (PVC) a zesíťovaný polyetylén (XLPE) našla uplatnění jako izolace všech druhů kabelů. Další často používané pevné dielektrikum je papír. Dřív se papír impregnovaný olejem používal jako izolace kabelů, dnes se papír používá jako izolace vinutí výkonových transformátorů. Jako pevná dielektrika lze uvést také různé kompozity a epoxidy.

4.3.1 Keramika

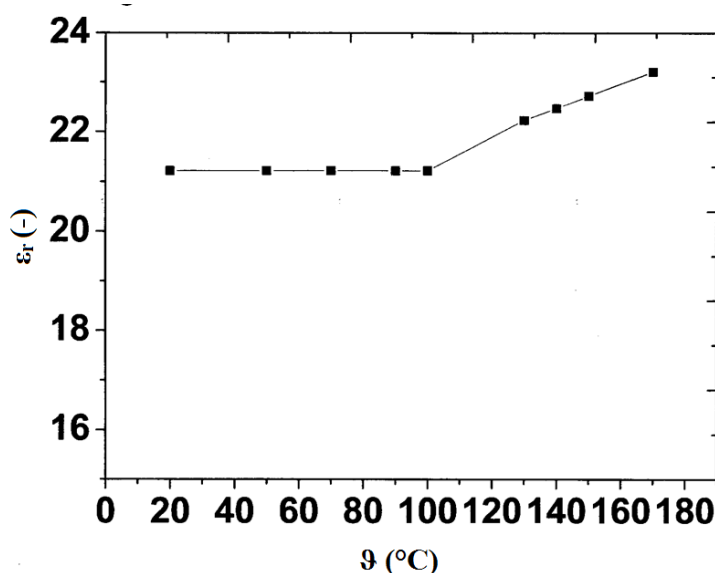
Keramika je jeden z nejstarších izolačních materiálů používaných v elektrotechnice. Keramické materiály díky svým rozmanitým vlastnostem našly uplatnění nejen v silnoproudé elektrotechnice, ale také ve vysokofrekvenční a oznamovací technice. Postupné zdokonalování těchto materiálů pro potřebu elektrotechniky dalo za vznik mimo jiné **porcelánu**. Porcelán je používán v rozvodu elektrické energie jako izolátor všech možných

druhů od závěsných izolátorů na vedeních po podpěrky sloužící k izolaci živých částí od konstrukcí v rozvodnách. Izolátory z porcelánu jsou podle místa jejich použití namáhány jak elektricky, tak i mechanicky a klimaticky.[8]

Porcelán se díky svým vlastnostem stal jedním z nejpoužívanějších izolačních materiálů, který se hojně používá dodnes. Důvodem, proč ještě nebyl nahrazen nějakým jiným materiálem, ve větším měřítku, je jeho velmi dobrá odolnost vůči klimatickým a chemickým vlivům. Mezi další přednosti porcelánu patří jeho dobrá odolnost vůči působení elektrického oblouku, která je zvláště důležitá u izolátoru VN a VVN. Další předností porcelánu je dobře zvládnutá výroba a hlavně cena vstupních materiálů, mezi které patří kaolín, křemen a živice. Porcelán lze rozdělit do několika skupin podle účelu a vlastností. První skupina je klasický vysokonapěťový porcelán pro izolátory. Druhá skupina porcelánových izolátorů je se zvýšeným obsahem křemíku. Větší obsah křemíku v porcelánovém izolátoru zapříčiní zlepšení elektromechanických vlastností. Další skupina porcelánových izolátorů je s oxidem hlinitým, ten se používá pro izolátory, kde je požadována ještě větší mechanická pevnost. Poslední skupinou je nízkonapěťový porcelán používaný pro izolátory do 500 V.[8,32]

Vlastnosti vysokonapěťového porcelánu uvedené v literatuře [8] jsou relativní permitivita 6 při 50 Hz a ztrátový činitel při 50 Hz a 20 °C se pohybuje v rozmezí 170 až 250. Měrný vnitřní odpor při 20 °C je v rozmezí 10^{11} až 10^{12} Ωcm . Při 200 °C je měrný vnitřní odpor v rozmezí 10^7 až 10^9 Ωcm .

Porcelán se ale nepoužívá jen jako izolátor v silnoproudé elektrotechnice. Používá se také v keramických kondenzátorech. Publikace [32] studuje vlastnosti porcelánu, který byl vyroben ze surovin, které jsou dostupné v Alžírsku. Z naměřených dat vyplynulo, že daný porcelán je vhodný jako dielektrikum pro keramické kondenzátory, jelikož relativní permitivita tohoto porcelánu se pohybuje kolem hodnoty 21. Na obrázku 4.12 je znázorněna závislost relativní permitivity na teplotě pro daný porcelán, závislost byla měřena při 1 kHz.



Obr. 4.12: Závislost relativní permitivity porcelánu na teplotě [32] - upraveno

Z obrázku je patrné, že relativní permitivita je přibližně do 100 °C konstantní, nad tuto hodnotu pak téměř lineárně roste. Tento růst je připisován DC vodivosti.

4.3.2 Sklo

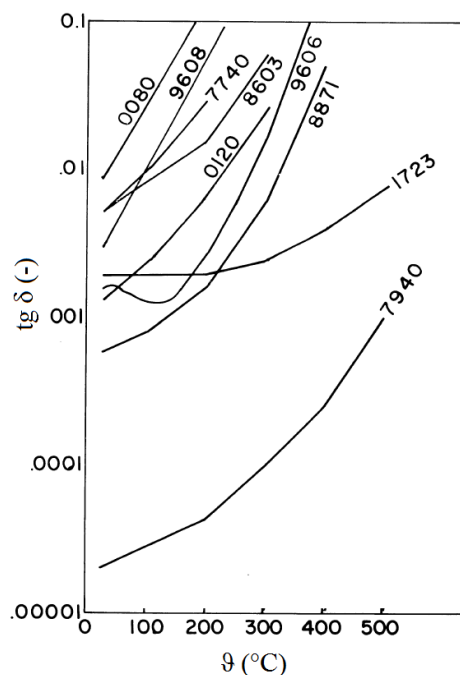
Jedná se o amorfni materiál. To znamená, že při jeho ochlazování z roztaveného stavu do stavu pevného se postupně zvyšuje jeho viskozita bez toho, aby při určité teplotě nastal přechod do krystalického stavu s pravidelnou strukturou. K nejvýznamnějším sklotvorným látkám patří kysličník křemičitý SiO_2 a kysličník boritý B_2O_3 . Jelikož by použití těchto skel bylo v praxi náročné díky vysokému bodu tavení $2000\text{ }^\circ\text{C}$ a velké viskozitě roztaveného křemenného skla, přidávají se do výsledné směsi další kysličníky, které upravují výsledné vlastnosti skla. Tyto kysličníky lze rozdělit do několika skupin podle toho, jaký vliv mají na výsledné sklo, a to na:

- Modifikátory jsou látky, které ovlivňují vlastnosti skla bez toho aby samy byly sklotvorné. Mezi ně patří Na_2O , K_2O , BaO . Tyto modifikátory podstatně snižují viskozitu skla.
- Látky, které nejsou sklotvorné, ale pomáhají v procesu výroby skla. Do této skupiny patří například Al_2O_3
- Mřížkotvorné látky, mezi které patří MgO nebo PbO .
- Poslední skupinou jsou různé příměsi, které mohou mít žádoucí nebo nežádoucí efekt na výsledné sklo. Do této skupiny lze zařadit látku jako Fe_2O_3 (nečistota).

Vodivost skel při nepříliš vysokých teplotách má iontový charakter. Nejvíce přispívají k vodivosti jednomocné ionty alkalických kovů. Iontová vodivost je silně závislá na teplotě. Nejmenší vodivost vykazuje křemenné sklo, u kterého je vodivost způsobená pouze přítomností stopového množství alkálií. Další důležitý parametr skla je měrná povrchová vodivost, ta je způsobená absorpcí vodního filmu a nečistot z ovzduší.[8]

Relativní permitivita skla se pohybuje od 3,7 do 8. Nejnižší hodnotu relativní permitivity má křemenné sklo 3,7.[8]

Publikace [34] se mimo jiné zabývala měřením ztrátového činitele komerčně dostupných skel. V studii byla měřena závislost ztrátového činitele na teplotě skla. Opět nejmenší ztráty vykazuje křemenné sklo, které je v grafu označeno kódem 7940. Toto sklo lze považovat za dokonalý dielektrický materiál.



Obr. 4.13: Závislost ztrátového činitele na teplotě pro různá komerčně dostupná skla [34] - upraveno

Sklo označeno kódem 0080 obsahuje značné množství sodíku. Jak je vidět z grafu, ztrátový činitel takového skla je značný už i při pokojové teplotě, a proto není vhodné jako dielektrický materiál. Na druhou stranu je takové sklo jednoduché na výrobu. Sklo s označením 9608 je ze sklo-keramického materiálu a obsahuje značné množství alkálií. Toto sklo není určeno pro elektrotechniku. Kódem 7740 je označeno bóro-silikonové sklo, toto sklo také obsahuje značné množství alkálií, a proto je rezistivita daného skla malá. Také není vhodné pro elektrotechnické účely. Mezi další sklo-keramická skla patří skla s označením 8603 a 9606. První jmenované obsahuje alkálie. Proto není úplně vhodné jako dielektrický materiál, nicméně toto sklo umožňuje díky svým vlastnostem vyrábět desky pro plošné spoje s extrémní přesností. Druhé jmenované sklo našlo uplatnění jako elektromagnetické stínění při zachování optické propustnosti. Toto sklo obsahuje malé množství alkálií, a proto vykazuje vynikající měrný objemový odpor při nízkých teplotách. Sklo 8871 je mix alkalického olova a křemíku. Toto sklo vykazuje velmi dobré hodnoty rezistivity. Mezi další přednosti tohoto skla patří jeho fyzikální vlastnosti, díky kterým z něj lze vyrábět tenké plátky. Pro je to ideální materiál pro kondenzátory. A poslední sklo s označením 1723 je sklo s nízkým obsahem alkálií. Výhodou toho typu skla je to, že manipulacemi s obsahem alkalických iontů lze měnit jeho rezistivitu od 10^7 až do $10^{30} \Omega\text{m}$. [34]

4.3.3 Papír

Na výrobu elektroizolačního papíru se používá buničina z jehličnatých stromů (smrk, jedle). Základní složkou nutnou pro výrobu papíru je celulóza. Ta je obsažena jak ve dřevě, kde je její obsah přibližně 50 až 60 %, tak i v bavlně, kde je její obsah až 90 %. Charakteristické vlastnosti papíru jsou dány chemickou stavbou celulózy a příměsemi. Velkou nevýhodou papíru je enormní schopnost pohlcovat vlhkost a kapaliny obecně. Na vláknech celulózy se absorbují vlhkost i při malých relativních vlhkostech. [8]

Relativní permitivita samotné buničiny se pohybuje v rozmezí hodnot 5,5 až 6. Relativní permitivitu papíru snižují vzduchové mezery mezi vlákny celulózy na 2,2 až 2,7. Dielektrické ztráty suchého papíru jsou v rozmezí hodnot 15 až $25 \cdot 10^{-4}$ při 50 Hz v teplotním rozsahu 20 až 100 °C. Měrná rezistivita se pohybuje v rozmezí 3 až $10 \cdot 10^{15} \Omega\text{m}$ při 20 °C a s rostoucí teplotou by se měla snižovat. Jak bylo napsáno výše, papír je velmi dobrý v pohlcování vlhkosti a vlhkost velmi významně ovlivňuje elektrické vlastnosti papíru. Proto je důležité zamezit vnikání vlhkosti do papíru. To lze provést pomocí impregnace papíru různými laky nebo jinými vhodnými látkami. [8]

Papír našel uplatnění v různých aplikacích. Dřív se používal jako izolant v kabelech jak silových, tak oznamovacích. V dnešní době se papír v podobě celulózy používá jako izolace vinutí ve výkonových transformátorech. Jelikož má ale papír sám o sobě malou eklektickou pevnost (díky vzduchovým mezerám v celulóze), začal se papír napouštět oleji, které nahradily vzduch ve struktuře celulózy. Impregnovaný papír se jeví ve své cenové kategorii jako nejlepší možná izolace.

Relativní permitivita impregnovaného papíru je sériová kombinace relativní permitivity papíru a relativní permitivity oleje použitého k impregnaci. Určitou roli v tom hraje taky poměr, v jakém jsou daná dielektrika spojena. Lze předpokládat, že čím delší impregnace papíru bude, tím znatelnější bude vliv oleje na celkovou relativní permitivitu impregnovaného papíru.

4.3.4 Polypropylén – PP

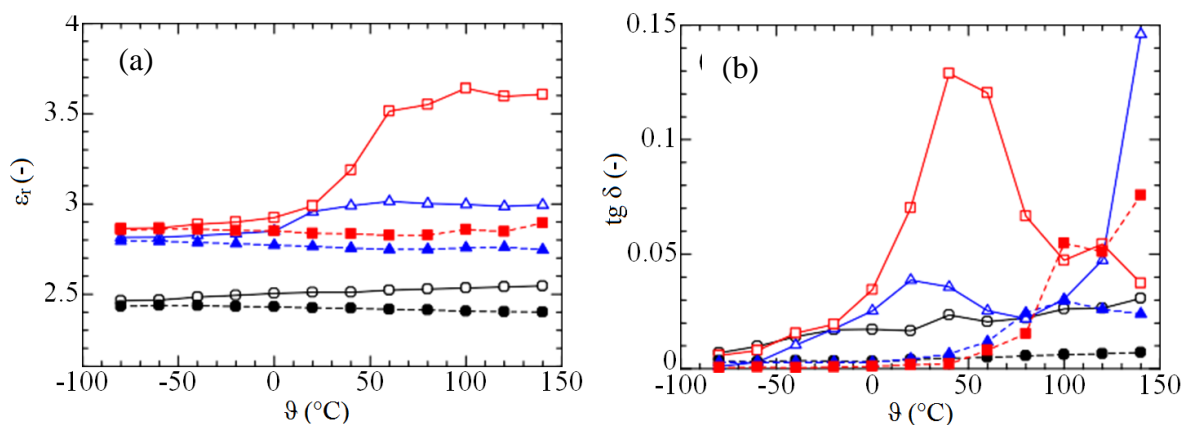
Polypropylén se vyrábí polymerací plynného propylénu. Je to nepolární látka, která je vysoce krystalická (kolem 60%), což polypropylénu dává specifické vlastnosti, mezi které patří vyšší mechanická pevnost při 20 °C, než jakou má polyetylén, rovněž má větší odolnost

vůči oděru. Při 100 °C má stejnou mechanickou pevnost jako polyetylén při 20 °C. Trvalá tepelná odolnost polypropylénu je při 100 °C. Určitou nevýhodou polypropylénu je to, že měď má na něj katalytické účinky. Když je polypropylén v přímém kontaktu s mědí, horní hranice maximální přípustné teploty se sníží na 60 °C. Bod křehnutí polypropylénu je v rozmezí teplot -5 až 20 °C. Snížit teplotu křehnutí lze pomocí přidání různých plniv. Například přidáním sazí se zvýší odolnost vůči UV záření. Elektrické vlastnosti čistého polypropylénu jsou: relativní permitivita je 2 a ztrátový činitel se pohybuje v rozmezí hodnot $2 \cdot 10^{-4}$ až $4 \cdot 10^{-4}$. [8]

Otázkou zůstává, jaký vliv mají tyto přidané látky na dielektrické vlastnosti polypropylénu.

Publikace [35] se zabývala vlivem hliníkových nanofillů na dielektrické vlastnosti polypropylénu. Předmětem studie byly tři druhy PP. První byl čistý polypropylén označen PP-0, druhý vzorek obsahuje 2 % přidaných nanofillů a má označení PP-2 a třetí vzorek obsahuje 6 % přidaných látek a má označení PP-6. Dielektrické vlastnosti jako relativní permitivita a ztrátový činitel byly měřeny v závislosti na teplotě.

Jak uvádí obrázek 4.14-(a), vliv hliníkových nanofillů na relativní permitivitu je patrný od teploty 20 °C, kde relativní permitivita narůstá až do 100 °C, pak nastává mírné ustálení. Vliv těchto látek na ztrátový činitel je patrný na obrázku 4.14-(b). Z něj lze vidět, že čím větší je obsah, tím výraznější vrchol charakteristika má. Naopak přidání hliníkových nanofillů má pozitivní vliv na odolnost polypropylénu vůči parciálním výbojům, jak uvádí studie.



Obr. 4.14: Závislost relativní permitivity a ztrátového činitele na teplotě pro různý obsah přidaných látek [35] - upraveno

Čtverečky označují polypropylén s 6 % obsahem hliníkových nanofillů, trojúhelníky značí 2 % obsah a kolečka značí polypropylén bez obsahu hliníkových nanofillů. Plné symboly značí charakteristiky, které byly měřeny při frekvenci 10^{-2} Hz, prázdné symboly značí charakteristiky měřené při 10^4 Hz.

Polypropylen se používá jako náhrada PVC izolace kabelů v málo větraných místech či tunelech kvůli tomu, že při hoření neprodukuje hustý dým a toxické látky. Také dobře odvolává vodě. [36]

4.3.5 Polyetylén – PE

Polyetylén se vyrábí polymerací plynného etylénu. Má nepolární charakter, tudíž lehce odolává vodě a jiným polárním rozpouštědlům. Stejně jako polypropylén je citlivý na UV záření, proto se do něj musí přidávat látky, které zlepšují jeho odolnost vůči tomuto záření. Bod křehnutí se pohybuje v rozmezí teplot -70 až -80 °C, na druhou stranu při zvyšování

teploty dochází k měknutí materiálu už i pod bodem tavení. To má za následek, že oblast teplot, při kterých lze izolace z polyetylenu používat, je omezena do 70 °C.[8;36]

Relativní permitivita polyetylenu se pohybuje kolem hodnoty 2,2 a je slabě závislá na teplotě, naopak na frekvenci je nezávislá až do hodnot 10^{10} Hz. Ztrátový činitel je v rozmezí hodnot $1 \cdot 10^{-4}$ až $5 \cdot 10^{-4}$ v celém rozsahu teplot. Měrná objemová rezistivita je při 20 °C 10^{15} až 10^{18} Ωm. Měrná povrchová rezistivita je 10^{12} až 10^{15} Ωm.[8]

Polyetylén je hořlavá látka. Používá se jako izolace všech druhů kabelů. Je využíván místo kovové ochrany kabelu a tam, kde jsou kabely vystaveny vodě (podmořské kabely) nebo vysoké relativní vlhkosti. Je třeba mít na paměti, že samotný polyetylén není odolný vůči mechanickému poškození. Proto je nutné ho kombinovat i s jinými izolacemi. Běžně se polyetylén používá u silových kabelů do 35 kV, výjimečně i do 70 kV.[8]



Obr. 4.15: Granulát používaný na výrobu polyetylenových izolací

Zlepšit mechanické vlastnosti polyetylenu lze jeho tzv. zesíťováním. Z toho vznikl zesíťovaný polyetylén XLPE.

4.3.6 Zesíťovaný polyetylén – XLPE

Hlavní výhoda zesíťování spočívá v tom, že se zlepší pevnost a tažnost při teplotách blízkých bodu tavení polyetylenu. To umožňuje zvětšit horní hranici provozních teplot kabelů a také to zvětšuje horní hranici kritické teploty, které může být kabel vystaven. Zlepšuje to také odolnost vůči oděru a povrchovému praskání. Zesíťování ale nezlepšuje odolnost polyetylenu vůči mechanickému namáhání a taky nezlepšuje odolnost vůči teplenému stárnutí. Zesíťování se provádí buď to přidáním malého množství peroxidu, nebo pomocí ionizačního záření. Druhý proces má výhodu v tom, že není potřeba vnášet cizí látky do struktury polyetylenu.[8;36]

Měření ztrátového činitele lze zjistit stav izolace kabelů, a tím i míru její degradace. Zesíťovaný polyetylén má přibližně dva řády menší dielektrické ztráty než PVC, nicméně jsou větší než u klasického polyetylenu.[36]

Podniková norma energetiky PNE 347625 uvádí, že ztrátový činitel nového kabelu s XLPE izolací do 35kV musí být při teplotě okolí menší než $40 \cdot 10^{-4}$ a při teplotě 95 až 100 °C musí být hodnota ztrátového činitele menší než $80 \cdot 10^{-4}$. PNE 34 7659-5 udává, že objemová rezistivita XLPE izolace při 90 °C nebude menší než 10^{10} Ωm. ČSN IEC 60502-2 uvádí, že maximální přípustná teplota jádra kabelu s XLPE izolací za normálního provozu je 90 °C. Při zkratu po dobu 5 sekund je přípustná teplota 250 °C. Tato norma také uvádí, že při elektrických zkouškách by ztrátový činitel kabelu při maximální teplotě jádra neměl být větší než $40 \cdot 10^{-4}$. [40;43;46]

Tloušťka izolace kabelů s XLPE se pohybuje od 2,5 mm pro kabel o průřezu jádra 10 mm^2 pro NN hladinu, do 8 mm pro kabely o průměru jádra 1600 mm^2 pro VN hladinu.[46]



Obr. 4.16: Granulát pro výrobu XLPE izolací

4.3.7 Polyvinylchlorid – PVC

PVC se vyrábí ze dvou surovin a to z acetylénu a chlóru. Je jedním z nejrozšířenějších termoplastů používaných po celém světě a ve všech možných odvětvích. PVC má polární charakter, z čehož vyplývá, že bude mít horší dielektrické vlastnosti než výše zmiňované termoplasty. Tyto vlastnosti jsou závislé na teplotě a frekvenci. Měrná objemová rezistivita se pohybuje v rozmezí 10^{12} až $10^{13} \Omega\text{m}$. Relativní permitivita je 3,2 až 3,6 a ztrátový činitel $200 \cdot 10^{-4}$. [8] Polyvinylchlorid je odolný vůči chemikáliím, nedá se rozpustit v kyselinách ani zásadách s výjimkou acetonu a pár dalších. Určitou výhodou PVC je to, že při odstranění plamene nehoří, na druhou stranu, když není plamen odstraněn hořením, PVC produkuje toxické výpary, které mohou do značné míry poškodit zdraví zasažených osob. To je důvod, proč je PVC nahrazováno PP nebo PE izolací.[8;36]



Obr. 4.17: Granulát používaný pro výrobu PVC izolací

Čistý PVC je tvrdý a netvárný materiál. Proto se doplňuje různými přísadami, plnivými, mazivými nebo změkčovadly, které upravují vlastnosti PVC, díky čemuž lze z PVC vytvářet v podstatě jakékoliv tvary. Většina změkčovadel jsou polární látky, a tedy budou mít negativní vliv na elektrické vlastnosti výsledného PVC. U měkčeného PVC je možné pozorovat znatelný pokles měrného vnitřního odporu s ohledem na obsah přidaných látek. Ztrátový činitel je větší u měkčeného PVC než u čistého PVC, a to přibližně $500 \cdot 10^{-4}$ při

50 Hz a 25 °C. Vhodným poměrem změkčovadla a polymeru lze docílit takových vlastností, které dovolí výslednou směs používat jako izolant.[8]

PVC se používá jako dielektrikum u NN kabelů, a to z důvodu vysoké relativní permitivity a velké hodnotě ztrátového činitele. Podniková norma energetiky uvádí, že rezistivita PVC izolace v NN kabelech by neměla být menší než $10^8 \Omega\text{m}$ při 70 °C. Norma ČSN IEC 60502-2 uvádí, že při elektrických typových zkouškách kabelů s PVC izolací by objemová rezistivita při 20 °C neměla být menší než $10^{12} \Omega\text{m}$. [42;46]

V poslední době jsou různé studie PVC, do kterých byly přidány různé mikro a nano materiály. V publikaci [37] se autoři zabývali PVC, do kterého bylo přidáno 2,5 až 5 % nanočástic oxidu křemičitého SiO₂. Vlivem těchto nano částic se zlepšily dielektrické vlastnosti daného PVC až o 30 %.

5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

V praktické části této diplomové práce byla měřena jak kapalná, tak pevná dielektrika. Měření bylo prováděno v laboratoři vysokého napětí na zařízení Tettex 2830/3831 od firmy Haefely. Větší pozornost byla věnována kapalným dielektrikům, a to z důvodu, že pevná dielektrika zpracovával jiný student v rámci své bakalářské práce.

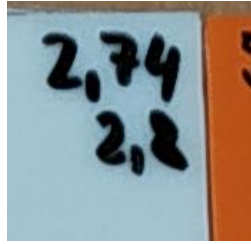
5.1 Vzorky

Z pevných dielektrik byly změřeny v rámci této práce jen **polyetylény**, **PVC** a různé druhy **papírů**. Mezi kapalná dielektrika která byla měřena v rámci praktické části práce, patří minerální olej s označením **Exxon Univolt 60**, ze syntetických olejů byl měřen silikonový olej s označením **Oil Pannoil**. Jako zástupce esterů byl měřen **Midel 7131**. První dva jmenované oleje byly přibližně 5 let skladovány na vzduchu v nádobách, kde se nacházely spolu se zařízeními, které chladily a zvyšovaly jejich elektrickou pevnost. Midel 7131 je nový čerstvý olej. Co se týče PE, PVC a papírů, taky jejich vzorky byly realizovány jako čtverce o rozměrech 10x10 cm. Skladování těchto vzorků bylo za přítomnosti vzduchu o relativní vlhkosti cca 20 % při teplotě přibližně 20 °C.



Obr. 5.1: Vzorky polyetylénů

Na obrázku 5.1 jsou vidět vzorky polyetylénů, které byly měřeny. Vzorky byly poskytnuty firmou NKT s.r.o. První vzorek zleva je čistý polyetylén s označením HE 6063. Jedná se o polyetylén, který se používá na opláštění kabelů, není tedy izolační. Druhý vzorek je z 98 % PE s označením HE 6063, ve kterém jsou 2 % barviva s označením RED PEZ 340185Q, také se jedná o plášťový polyetylén. Třetí měřený vzorek je z 92 % PE s označením HE 6063 s 8 % retardantu Y7108-FT-50FR, taktéž plášťový. Předposlední vzorek je z 98 % plášťový polyetylén s označením ECOOH 5555 ve kterém jsou přidána 2 % barviva s označením 2001-OR-50. Poslední vzorek představuje 95 % PE s 5 % katalyzátoru s označením 4476. Jako jediný měřený tento vzorek polyetylénu izolační, používá se tedy jako izolační médium v kabelech. V levém horním rohu je označení vzorku, v pravém horním rohu je jeho tloušťka (v mm) a pod ní je, o kolik procent se liší měřené tloušťky v různých místech vzorku vůči jeho průměrné tloušťce.



Obr. 5.2: Tloušťka vzorku spolu s procentní odchylkou

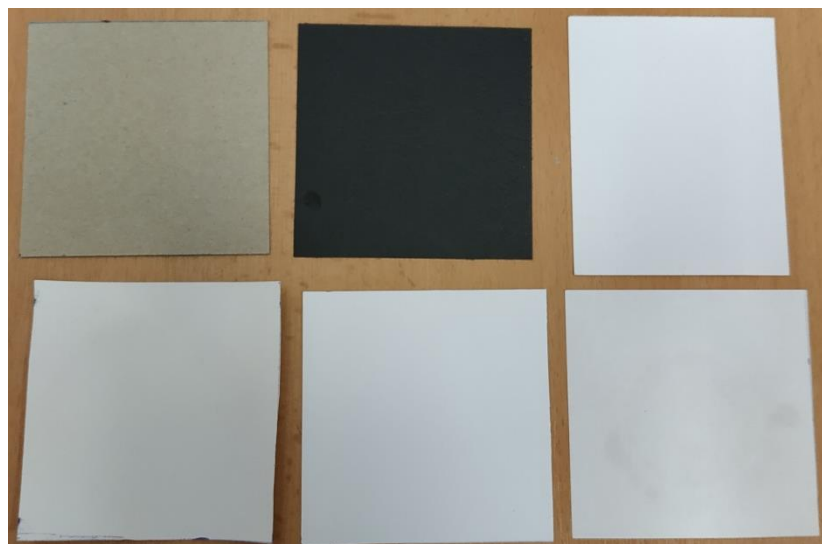
Pro měření jsem se ze vzorků snažil vybrat ty, které měly co nejvíce podobnou tloušťku a co nejmenší procentní odchylku od průměrné tloušťky. Tloušťka vzorků byla měřena pomocí mikrometru.

Mezi dalšími pevnými dielektriky měřená v rámci této práce byly různé vzorky PVC. Celkem byly měřeny čtyři druhy.



Obr. 5.3: Vzorky polyvinylchloridů

Jedná se o čisté PVC jen s jinými vlastnostmi, které budou popsány v dalším textu. Na obrázku zleva je vzorek izolačního PVC s označením IS9-622, druhý vzorek má označení IS9-613, předposlední vzorek nese označení IS9-610 a poslední vzorek je označen PS9-609. Poslední vzorek PVC se používá pro pláště kabelů. Izolační směsi se používají jako izolace v NN kabelech. Princip měření tloušťky vzorků byl stejný jakou při PE. Jako poslední pevná dielektrika byly měřeny různé druhy papírů.



Obr. 5.4: Vzorky papírů

Na obrázku 5.4 se v horní řadě zleva nachází kartón. Měření s kartónem bylo víc, byl měřen jak suchý kartón, tak kartóny, který byly namočený jak v silikonovém, tak v minerálním oleji. Doba namáčení byla cca jeden měsíc. Před měřením namočeného kartónu jsem chvíli počkal, až odteče přebytečný olej a zahájil jsem měření. Tyto vzorky nebyly po vybrání z olejové lázně nijak sušeny. Druhý v pořadí je papír, který se používá jako zadní desky u kroužkové vazby. Poslední papír v horní řadě je tvrdý papír. První vzorek ve spodní řadě je kompozit papíru a gumy, předposlední vzorek je tvrdý papír, jenž prošel nějakou úpravou, která upravila jeho vlastnosti, a tím pádem je hladký a lesklý. Polední vzorek je klasický kancelářský papír. Bohužel u vzorku papírů nebylo možné zajistit alespoň podobnou tloušťku z důvodu, že každý vzorek je koncepčně jiný. Největší tloušťku má kartón (0,71 mm), nejmenší kancelářsky papír (0,11 mm).

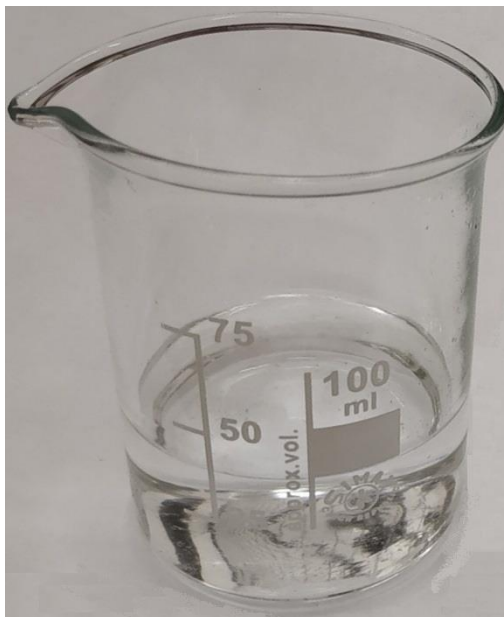
Z kapalných dielektrik byly měřeny tři druhy izolačních kapalin. První měřenou izolační kapalinou byl minerální olej s označením Exxon Univolt 60. Jedná se o jedno z nejrozšířenějších izolačních medií používaných v elektroenergetice. Více o minerálním oleji lze nalézt v kapitole 4.2.1. Olej je čirý a má mírně nažloutlou barvu jak je vidět na obrázku 5.5. Pro měření bylo použito 40 ml oleje. Olej nebyl vystaven provozu jako takovému, ale byl použit v laboratoři jako chladicí médium v přípravku a po dobu cca 5-ti let byl vystaven vzdušné vlhkosti.



Obr. 5.5: Vzorek minerálního oleje

Myslím si, že větší vliv na parametry oleje mělo zařízení, které olej obklopovalo než vzdušná vlhkost.

Druhý měřený olej byl silikonový olej označen jako Oil Panoil. Opět pro měření bylo použito 40 ml tohoto oleje. Olej v laboratoři také slouží jako chladicí a izolační médium v zařízení, které cca 5 let stojí na vzduchu. Proto také tento olej nelze považovat za nový. Silikonový olej je čirý a viskozitu má podobnou minerálnímu oleji.



Obr. 5.6: Vzorek silikonového oleje

Jako poslední z měřených vzorků kapalných dielektrik byl esterový olej. Jako ester byl použit Midel 7131. Jedná se o nový olej, čili jeho parametry by neměly být ničím ovlivněny. Ester má větší viskozitu než minerální nebo silikonový olej, z tohoto důvodu má zhoršenou schopnost odvádět teplo z vinutí uvnitř stroje. Olej je zakalený a mírně nažloutlý. Pro měření bylo opět použito 40 ml tohoto oleje.



Obr. 5.7: Vzorek esterového oleje

5.2 Pracoviště

Měření se provádělo v laboratoři vysokého napětí na zařízení Tettex 2830/2831 s buňkou 2914 a buňkou 2903. Na fotce je vidět zapojení buňky 2914 pro měření pevných dielektrik, kde celá soustava je umístěná v racku, který má kolečka a lze s ním tak jednoduše

manipulovat. Operační systém procesní jednotky běží na Windows a jeho ovládání je zcela intuitivní a jednoduché. Lze k ní také připojit myš pomocí USB portu, není tedy nutné během měření u soupravy stát.



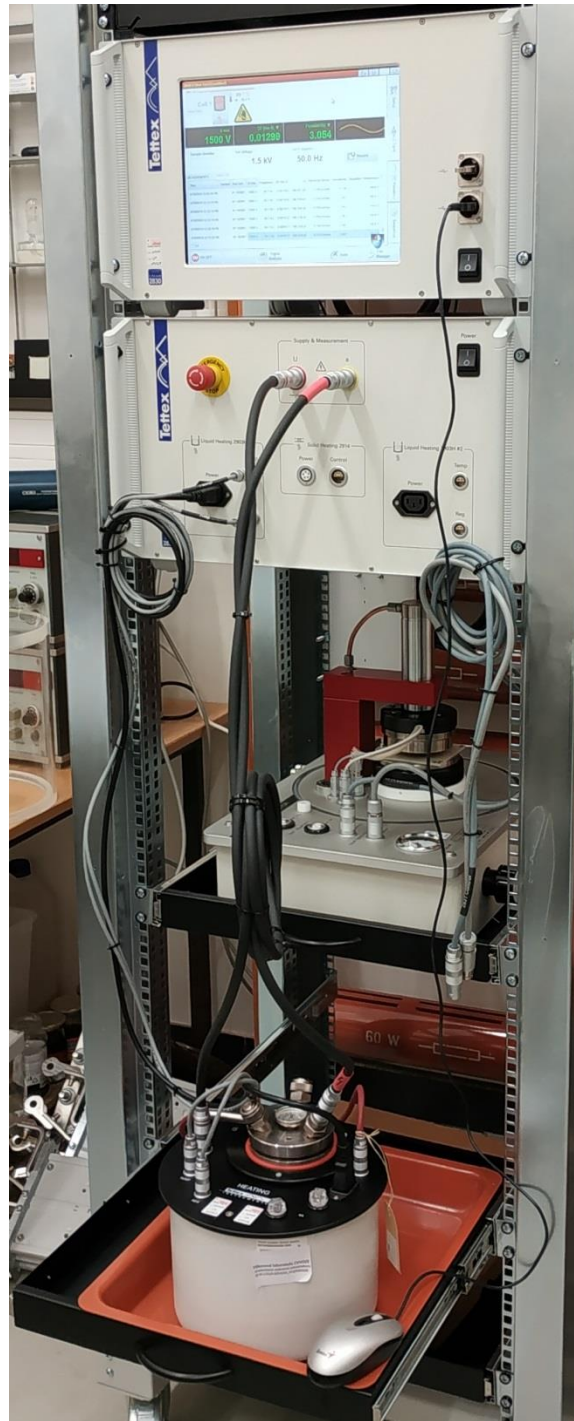
Obr. 5.8: Zapojení soustavy pro měření pevných dielektrik

Na obrázku 5.8 lze vidět zapojenou soustavu pro měření pevných dielektrik. Na vrchu v racku je procesní jednotka Tettex 2830, která zpracovává měřená data a zobrazuje je na dotykovém displeji. Pod ní se nachází vysokonapěťový zdroj Tettex 2831, který generuje potřebná napětí nutná pro měření. Tento člen také obstarává napětí pro vyhřívání buňky. Na výsuvném panelu se nachází buňka pro měření pevných dielektrik Tettex 2914.



Obr. 5.9: Detail buňky 2914

Na detailu buňky 2914 lze vidět nátrubky pro připojení hadic na odčerpání atmosféry zevnitř buňky. Ze druhé strany buňky je ovládací člen, kterým se nastavuje přítlačná síla elektrod. Buňka je vybavena pojistným spínačem, který zabraňuje připojení napětí na elektrodu, když kryt není správně přiklopen. V buňce lze také vyměnit spodní elektrodu za elektrodu, která má vyvýšený okraj. Tato elektroda byla využita při měření kartónu, který byl napuštěn olejem. Na obrázku 5.10 lze vidět zapojení aparatury pro měření kapalných dielektrik.



Obr. 5.10: Zapojení aparatury pro měření kapalných dielektrik

Jak lze vidět, buňka Tettex 2903 pro měření kapalných dielektrik se nachází pod buňkou pro pevná dielektrika. Celá měřicí aparatura je tedy umístěná v jednom racku. Toto umístění shledávám velmi praktickým.

5.3 Postupy měření

Při měření pevných dielektrik jsem nejdřív vložil desku se vzorkem mezi elektrody a nastavil požadovanou přítlačnou sílu. Během měření jsem používal stejnou přítlačnou sílu pro veškerá pevná dielektrika, tedy 5 N/cm^2 . Dále jsem nastavil do programu tloušťku daného vzorku a velikost napětí, které bude přivedeno na vzorek. Následně jsem nastavil požadovanou teplotu, při které budu odečítat měřené parametry. Pak jsem čekal, než teplota dosáhne požadované hodnoty s tolerancí $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, což mnohdy trvalo víc než 20 minut. Následně jsem odečetl 5 hodnot ztrátového činitele a relativní permitivity, které jsem při zpracovávání zprůměroval, a vypočetl jsem směrodatnou odchylku. Mezi jednotlivými odečty byla časová prodleva cca 1 minutu. Tento postup byl opakován do doby, než byl změřen požadovaný rozsah teplot. Pro polyetylény to bylo od $25 \text{ }^\circ\text{C}$ do $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Krok, po kterém byla teplota zvedána byl $5 \text{ }^\circ\text{C}$. PVC bylo měřeno jen při $70 \text{ }^\circ\text{C}$ a papír při $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Napětí použito při měření PE mělo hodnotu 1500 V, papíry byly měřeny při 800 V. Při měření ztrátového činitele a relativní permitivity PVC bylo použito napětí o hodnotě 1000 V. Frekvence všech napětí byla 50 Hz. Rezistivita polyetylénu nešla změřit z důvodu, že PE má tak vysokou hodnotu, že ji přístroj není schopen změřit. Rezistivitu papírů byla měřena 1092 V stejnosměrných. Čas zkratování elektrod byl 1 minuta, čas měření taktéž 1 minuta. Při měření rezistivity PVC bylo použito stejné napětí jak při měření rezistivity papírů, čas měření a zkratování jsou rovněž totožné.

Co se týče kapalných dielektrik tak pro měření jsem využil celý objem buňky, tedy 40 ml. Před aplikací oleje jsem změřil prázdnou buňku, její relativní permitivitu a ztrátový činitel. Podle toho lze poznat, jak moc čistá buňka je. Změřená kapacita buňky byla cca 63,5 pF, výrobce udává, že kapacita prázdné buňky je cca 60 pF. Z tohoto plyne, že i když buňka byla řádně vyčištěna a vysušena tak nebyla dokonale čistá. To na ní bylo i vidět, na komponentech bylo možné pozorovat zbytky připáleného oleje. Nicméně na měření to nemá až tak velký vliv, protože buňku lze zkalibrovat tím, že ji zadám měřenou kapacitu prázdné buňky, v mém případě tedy 63,5 pF a tím docílím toho, aby měřená relativní permitivita prázdné buňky byla 1. Aplikace oleje do buňky se provádí stříkačkou, pomocí které se taky dá odměřit požadovaný objem. Vstříknutí oleje do buňky se provádí otvorem na jejím vrchu. Na minerálním a silikonovém oleji bylo provedeno měření závislosti ztrátového činitele a relativní permitivity na napětí při čtyřech různých teplotách. Princip nastavování teploty byl stejný jako u pevných dielektrik. Teploty, při kterých byly závislosti měřeny, jsou 20 , 40 , 70 a $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Co se týče napětí, měření bylo provedeno v celém rozsahu, které zařízení umožňuje, tedy od 200 do 2000 V. Krok, po kterém bylo napětí zvyšováno, byl 100 V do hodnoty napětí 1200 V, pak byl krok zvětšen na 200 V. Frekvence napětí byla 50 Hz. Opět jsem odečítal 5 hodnot při každém napětí a pracoval stejně jako u pevných dielektrik. Teplotní závislost ztrátového činitele a relativní permitivity esteru Midel 7131 byla měřena při 1500 V a 50 Hz. Rozmezí teplot bylo 20 až $120 \text{ }^\circ\text{C}$ s krokem $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Opět 5 hodnot při každé teplotě. Frekvenční závislost sledovaných parametrů minerálního a silikonového oleje byla měřena při 1000 V a 50 Hz, při měření frekvenční závislosti esterového oleje bylo použito napětí 1500 V a 50 Hz. Teplota, při které byly tyto závislosti měřeny byla $70 \text{ }^\circ\text{C}$ pro všechny tři oleje. Rezistivitu olejů byla měřena pro čtyři teploty, a to pro 20 , 40 , 70 a $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Použité stejnosměrné napětí mělo hodnotu 1000 V, čas zkratování elektrod a čas měření jsou totožné jako při měření rezistivity pevných dielektrik.

5.4 Zpracované výsledky

V následujících kapitolách budou popsány jednotlivá měření, která byla během praktické části této diplomové práce provedena. V samotných kapitolách budou popsány jednotlivé materiály.

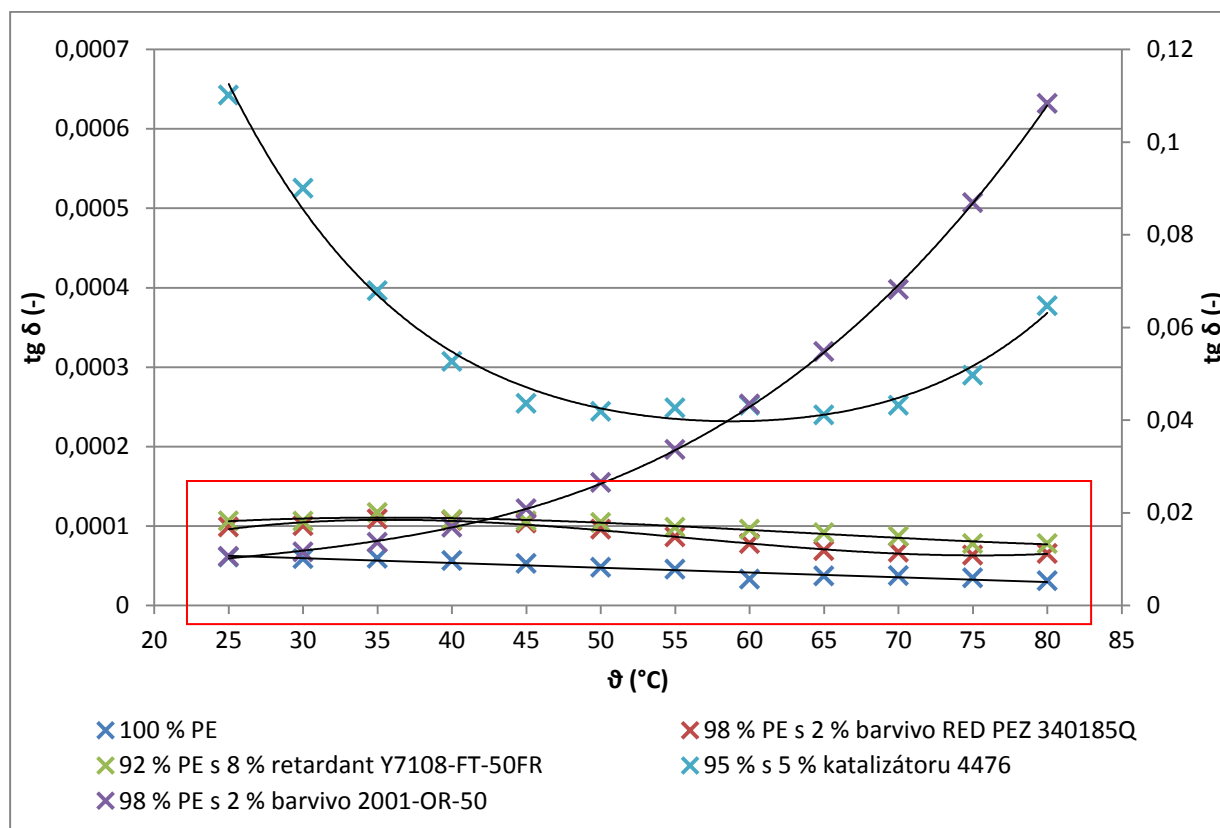
5.4.1 Měření polyetylénů

V prvním měření jsem měřil teplotní závislosti ztrátového činitele a relativní permitivity na teplotě pro polyetylén. Měřil jsem několik vzorků PE, jednalo se buď o čistou směs polyetylénu nebo o PE s různými aditivami či už barvivy nebo retardanty. Podmínky měření lze nalézt v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Podmínky měření polyetylénů

Podmínky měření		
Napětí	1500	V
Frekvence	50	Hz
Přítlačná síla	5	N/cm ²
Relativní vlhkost	24,3	%

Na obrázku 5.11 lze vidět závislost ztrátového činitele na teplotě pro různé druhy polyetylénu.

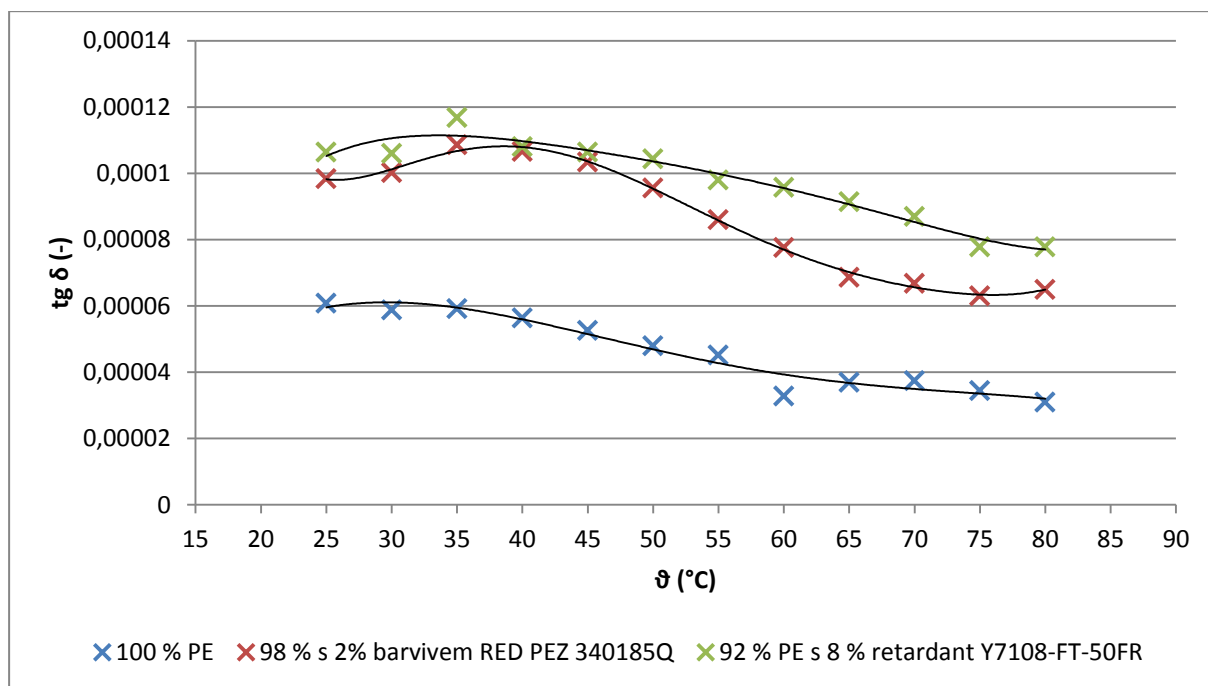


Obr. 5.11: Závislost ztrátového činitele polyetylénu na teplotě

- **fialová závislost je na vedlejší ose**

Ze závislostí je patrné, že barvivo RED PEZ 340185Q a retardant Y7108-FT50FR mají na výslednou směs jen zanedbatelný vliv, jelikož se hodnota ztrátového činitele zvedla jen

nepatrně vůči čistému polyetylenu. Na obrázku 5.12 lze vidět označenou oblast grafu z obrázku 5.11 ve větším měřítku.

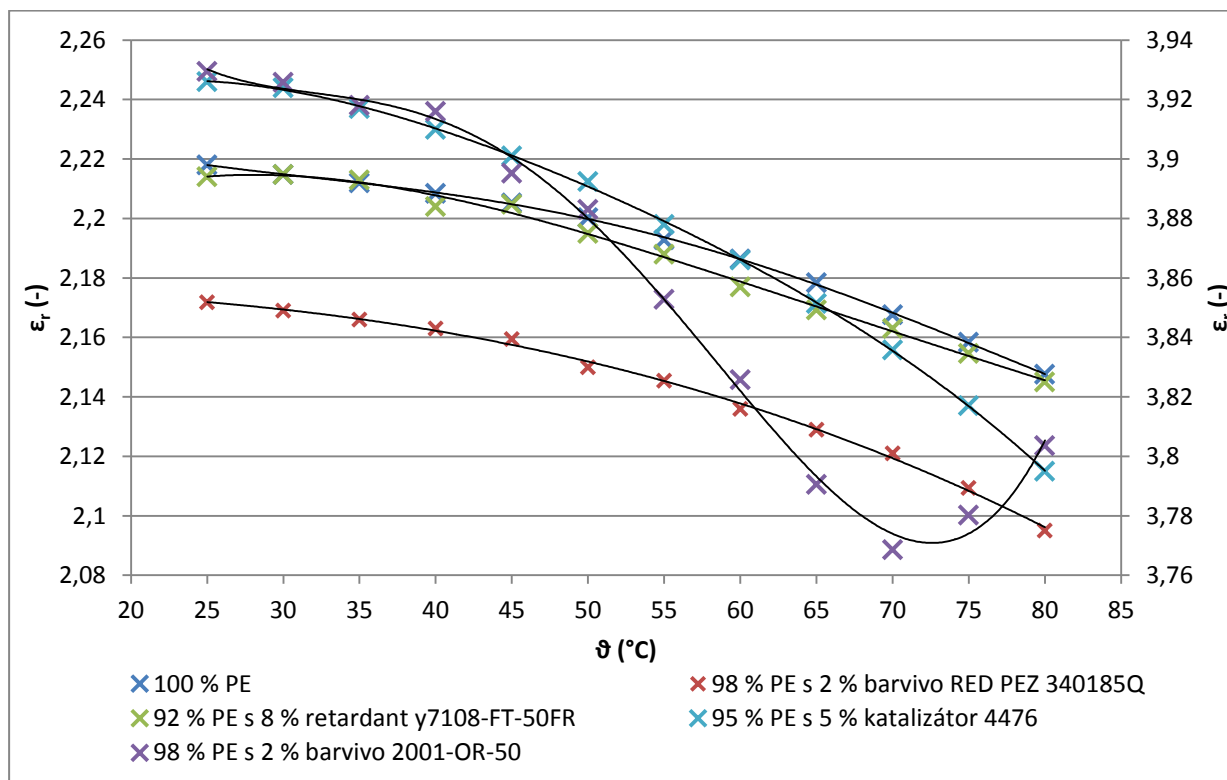


Obr. 5.12: Zvýrazněná oblast grafu na obrázku 5.11

Z obrázku 5.12 je vidět, že čistý polyetylén cca do 30 °C má stoupající trend, poté nastává maximum ztrátového činitele a za touto teplotou má charakteristika klesající trend. U polyethylénu s barvivem lze vidět, že se maximum posouvá cca k 40 °C, pak má charakteristika klesající trend do teploty 75 °C, za touto teplotou lze pozorovat opět mírný nárůst hodnoty ztrátového činitele. PE s 8 % obsahem retardantu má maximum u teploty cca 35 °C, za touto teplotou má charakteristika klesající trend. Obecně lze pro tyto tři typy PE konstatovat, že po mírném nárůstu hodnoty ztrátového činitele nastává pokles jeho hodnoty, ať už je v PE přítomná nějaká příměs či nikoliv.

Světle modrá charakteristika na obrázku 5.11 zobrazuje závislost ztrátového činitele polyethylénu, který se jako jediný z měřených používá na izolování kabelů. Ostatní druhy se používají jen jako opláštění kabelů. Z obrázku je patrné, že charakteristika má parabolický tvar. Nárůst hodnoty ztrátového činitele od teploty 65 °C mohl být způsoben tím, že ve vzorku začal vlivem teploty proces částečného zesíťování.

Fialová charakteristika na obrázku 5.11 zobrazuje teplotní závislost polyethylénu, který je tvořen retardantem hoření ECOOH 5555 a barvivem 2001-OR-50. Je otázkou, zda lze tuto kompozitní sloučeninu považovat na polyetylén.



Obr. 5.13: Závislost relativní permitivity polyetylénu na teplotě

- fialová závislost je na vedlejší ose

Na obrázku 5.13 lze vidět teplotní závislosti relativní permitivity polyetylénů s různými příměsemi. Zde je vidět, že měřené charakteristiky potvrzují teoretický předpoklad z kapitoly 2.4, a to sice, že relativní permitivita se rostoucí teplotou bude klesat. Také je vidět, že retardant Y7108-FT-50FR nemá téměř žádný vliv na hodnotu relativní permitivity, zatímco barvivo RED PEZ 340185Q snižuje hodnotu relativní permitivity skoro o tři setiny. To je způsobeno tím, že tento druh barviva je založen na oxidu železa. Největší hodnotu relativní permitivity vykazuje 98 % polyetylénu ECOOH 5555 s barvivem 2001-OR-50 a to 3,92 při 25 °C. Nejmenší hodnotu má polyetylén s barvivem RED PEZ 340185Q, 2,17 při 25 °C.

5.4.2 Měření polyvinylchloridů

Mezi další měření, které byla provedena, patří měření ztrátového činitele, relativní permitivity a objemové rezistivity PVC. V tomto případě nebyla provedena měření závislostí ale jenom změřeni parametrů jednotlivých vzorků při jedné konkrétní teplotě. Podmínky měření ztrátového činitele, relativní permitivity a rezistivity lze nalézt v tabulce 5.2.

Tab. 5.2: Podmínky měření polyvinylchloridů

Podmínky měření ($\text{tg } \delta; \epsilon_r$)			Podmínky měření (ρ)		
Napětí	1000	V	Napětí	1000	V
Frekvence	50	Hz	Relativní vlhkost	23,9	%
Relativní vlhkost	23,9	%	Čas měření	60	s
Teplota vzorku	70	°C	Čas zkratování	60	s
Přítlačná síla	5	N/cm ²	Teplota vzorku	70	°C
			Přítlačná síla	5	N/cm ²

Zpracovaná data z měření lze nalézt v tabulce 5.3.

Tab. 5.3: Zpracovaná data z měření PVC

Druh PVC	Tloušťka (mm)	$\text{tg } \delta (-)$	$\epsilon_r (-)$	$\rho (\text{M}\Omega\text{m})$
IS9-622	2,70	0,52174±0,00576	8,2534±0,0203	129,56
IS9-613	2,75	0,27232±0,00251	8,3662±0,0049	225,80
IS9-610	2,91	0,07119±0,00085	7,812±0,0065	3080,00
PS9-609	2,86	0,4180±0,00741	8,226±0,0564	202,90

Ze změřených hodnot je vidět, že se nejedná o čisté PVC, ale o PVC, ve kterých jsou přidaná určitá změkčovadla, retardanty hoření a možná i další látky. Literatura [8] uvádí, že čisté PVC má hodnotu relativní permitivity v rozmezí hodnot 3,2 až 3,6. Mnou měřené hodnoty jsou v rozmezí 7,8 až 8,4, z toho je patrné, že vzorky v laboratoři obsahují nejen PVC ale také další látky. Stejná situace nastala u ztrátového činitele, literatura [8] uvádí, že čisté PVC má hodnotu ztrátového činitele 0,02, u měkčeného PVC je tato hodnota podle literatury [8] cca 0,05. U vzorku IS9-610 lze pozorovat, že ztrátový činitel má podobnou hodnotu (0,07), jakou má měkčený PVC v literatuře, [8] z toho usuzují, že tento vzorek bude obsahovat jen změkčovadla. Co se týče objemové rezistivity, PNE 34 7659-3 uvádí, že její hodnota by neměla být menší než 100 M Ω m. Z výsledku měření je patrné, že veškeré měřené vzorky této normě vyhovují a materiál, ze kterého jsou vyrobeny, lze použít jako izolant pro kabely nízkého napětí. U vzorku s označením IS9-622 je hodnota rezistivity 129,56 M Ω m, což je nejnižší měřená hodnota. Podle toho usuzují, že daný vzorek bude obsahovat mimo jiné i retardanty hoření, které mají většinou polární charakter. Tyto retardanty zmenšují hodnotu rezistivity a zvětšují hodnotu ztrátového činitele, která je u tohoto vzorku 0,521 – největší měřenou hodnotou.

5.4.3 Měření papírů

Mezi další měření, během kterých nebyly měřeny žádné závislosti ale jenom konstantní hodnoty při určité teplotě, patří měření parametrů různých druhů papírů.

Podmínky měření lze nalézt v tabulce 5.4.

Tab. 5.4: Podmínky měření papírů

Podmínky měření ($\text{tg } \delta; \epsilon_r$)			Podmínky měření (ρ)		
Napětí	800	V	Napětí	1092	V
Frekvence	50	Hz	Relativní vlhkost	30,2	%
Relativní vlhkost	30,2	%	Čas měření	60	s
Teplota vzorku	25	°C	Čas zkratování	60	s
Přítlačná síla	5	N/cm ²	Teplota vzorku	25	°C
			Přítlačná síla	5	N/cm ²

V této části měření jsem měřil a porovnal různé druhy papírů, které byly k dispozici v laboratoři. Mimo papíry jsem změřil i jeden kompozit, který se skládal z pogumovaného papíru. Zpracovaná data k této části měření lze nalézt v tabulce 5.5.

Tab. 5.5: Zpracovaná data z měření papírů

Druh papír	Tloušťka (mm)	$\text{tg } \delta$ (-)	ϵ_r (-)	ρ (G Ω m)
Kompozit papír-guma	0,420	0,064636 \pm 0,0000051	3,1352 \pm 0,00037	31,050
Tvrký papír	0,305	0,307480 \pm 0,000424	2,8672 \pm 0,00049	1,420
Tvrký papír - hladký	0,245	0,254780 \pm 0,000159	4,6936 \pm 0,00025	2,210
Černý papír (deskový)	0,300	0,317280 \pm 0,000102	3,2586 \pm 0,00025	0,958
Kartón	0,710	0,434380 \pm 0,00002	3,4548 \pm 0,00058	1,1
¹⁾ Kancelářský papír	0,110	0,421920 \pm 0,000208	4,344 \pm 0,001	-
Kartón napuštěn silikonovým olejem	0,710	0,332620 \pm 0,000276	5,734 \pm 0,0017	-
Kartón napuštěn minerálním olejem	0,710	0,345480 \pm 0,000037	5,141 \pm 0	-

¹⁾ měřeno při 400 V

Ze změřených dat lze vidět, že nejmenší ztrátový činitel má kompozit papír-guma, jenž má největší objemovou rezistivitu. To je způsobeno gumou, která je součástí daného kompozitu. Nejmenší rezistivitu vykazuje černý papír, který se používá jako zadní desky v kroužkové vazbě. U kartónu si lze povšimnout, že suchý kartón má hodnotu relativní permitivity cca 3,45, zatím co kartón napuštěn minerálním olejem cca 5,14. To odpovídá předpokladu, že relativní permitivita impregnovaného papíru (v mém případě kartónu) je sériová kombinace relativní permitivity kartónu a relativní permitivity minerálního oleje.

$$\epsilon_{ik} = \epsilon_k + \epsilon_{mo} = 3,45 + 2,2 = 5,65 \quad (5.1)$$

, kde ϵ_{ik} je relativní permitivita impregnovaného kartónu, ϵ_k je relativní permitivita suchého kartónu a ϵ_{mo} je relativní permitivita minerálního oleje. Ovšem teoretická hodnota neodpovídá úplně přesně měřené hodnotě, je ji velmi podobná a lze tedy předpoklad o sériové kombinaci považovat za správný. Stejná situace je u kartónu napuštěného silikonovým olejem, kde se teoretická a změřená hodnota liší o čtyři desetiny. Impregnace kartónu trvala cca jeden měsíc.

5.4.4 Měření olejů

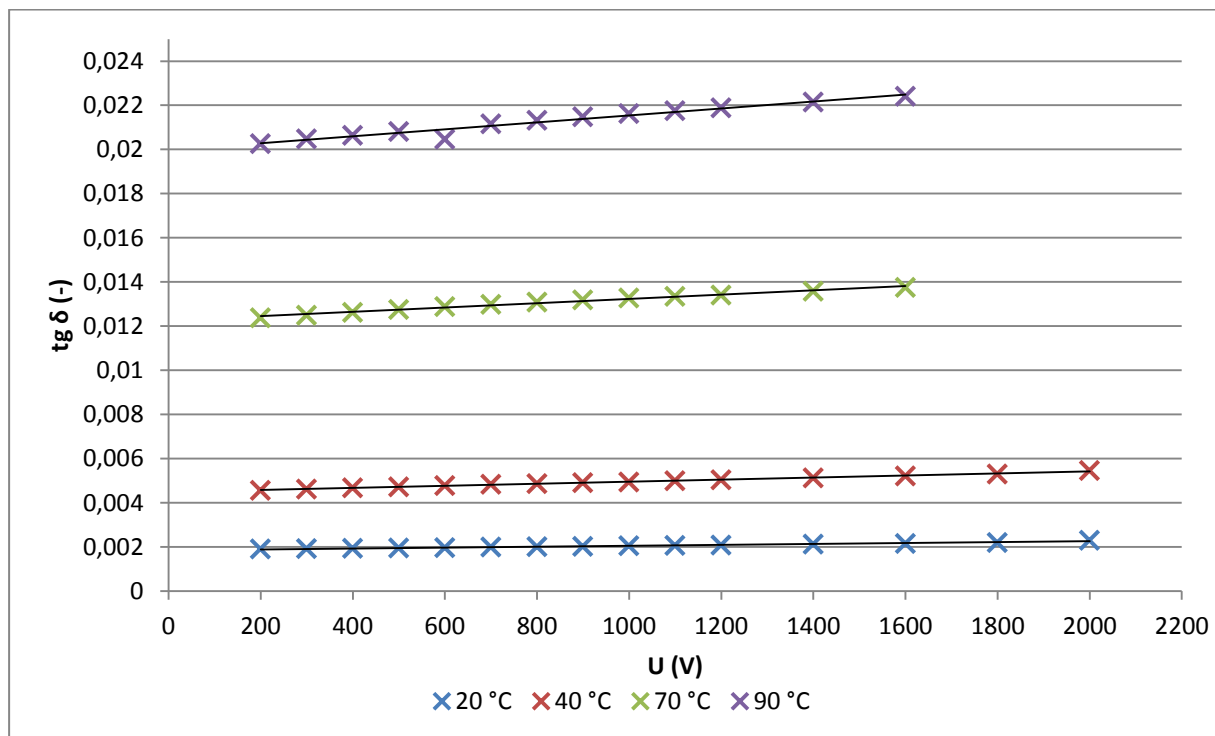
V této části měření jsem se zabýval měřením sledovaných parametrů, a to jak jejich teplotní závislostí, tak i závislosti na napětí, potažmo na frekvenci. Teplotní závislost sledovaných parametrů jsem měřil pro esterový olej. Závislost relativní permitivity a ztrátového činitele na napětí a frekvenci jsem měřil jak pro minerální, tak pro silikonový olej. Frekvenční závislost sledovaných parametrů byla změřená i pro esterový olej. U všech tří olejů byla také změřena objemová rezistivita.

V prvním měření jsem měřil závislost ztrátového činitele a relativní permitivity na přiloženém napětí pro čtyři různé teploty minerálního oleje. V tabulce 5.6 lze nalézt podmínky měření.

Tab. 5.6: Podmínky měření minerálního oleje

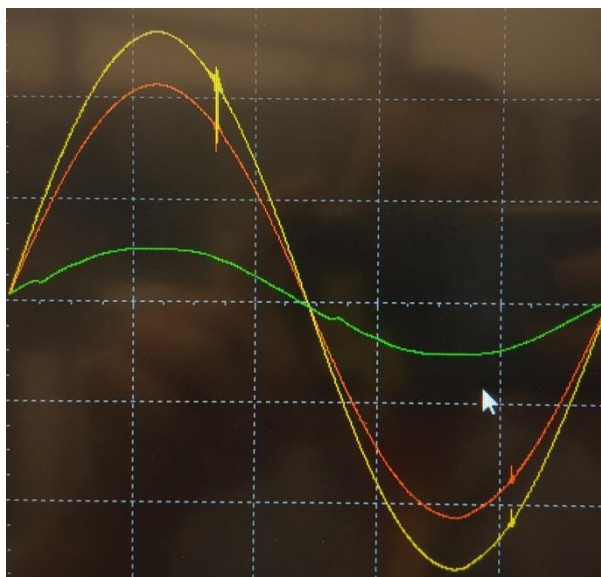
Podmínky měření		
Frekvence	50	Hz
Relativní vlhkost	23,5	%
Teplota vzorku	20; 40; 70; 90	°C

Ze získaných závislostí, které lze vidět na obrázku 5.13 je patrné, že napětí má jen nepatrný vliv na hodnotu ztrátového činitele.



Obr. 5.14: Závislost ztrátového činitele minerálního oleje na přiloženém napětí

Na grafu je možné vidět, že čím je teplota vzorku vyšší, tím je vliv napětí markantnější. Nicméně i při 90 °C je tento vliv dost malý. Rozdíl mezi první a poslední měřenou hodnotou je cca $2 \cdot 10^{-3}$. Při 20 °C má závislost téměř rovnoběžný charakter s osou x. Na obrázku si lze také povšimnout, že pro 70 a 90 °C jsou charakteristiky měřeny jen do 1600 V a ne do 2000 V jako závislosti při 20 a 40 °C. To bylo způsobeno tím, že nad hodnotu napětí 1600 V se začali ve vzorku objevovat parciální výboje, které znemožňovali přesně změřit hodnoty ztrátového činitele. To, že se jednalo o parciální výboje ukazuje průběhu proudu, který vzorkem protékal. Průběh lze vidět na obrázku 5.15.



Obr. 5.15: Průběh proudu měřeným vzorkem

Na obrázku 5.15 lze vidět impulzy na sestupné hraně průběhu, které značí, že se ve vzorku vyskytují parciální výboje.

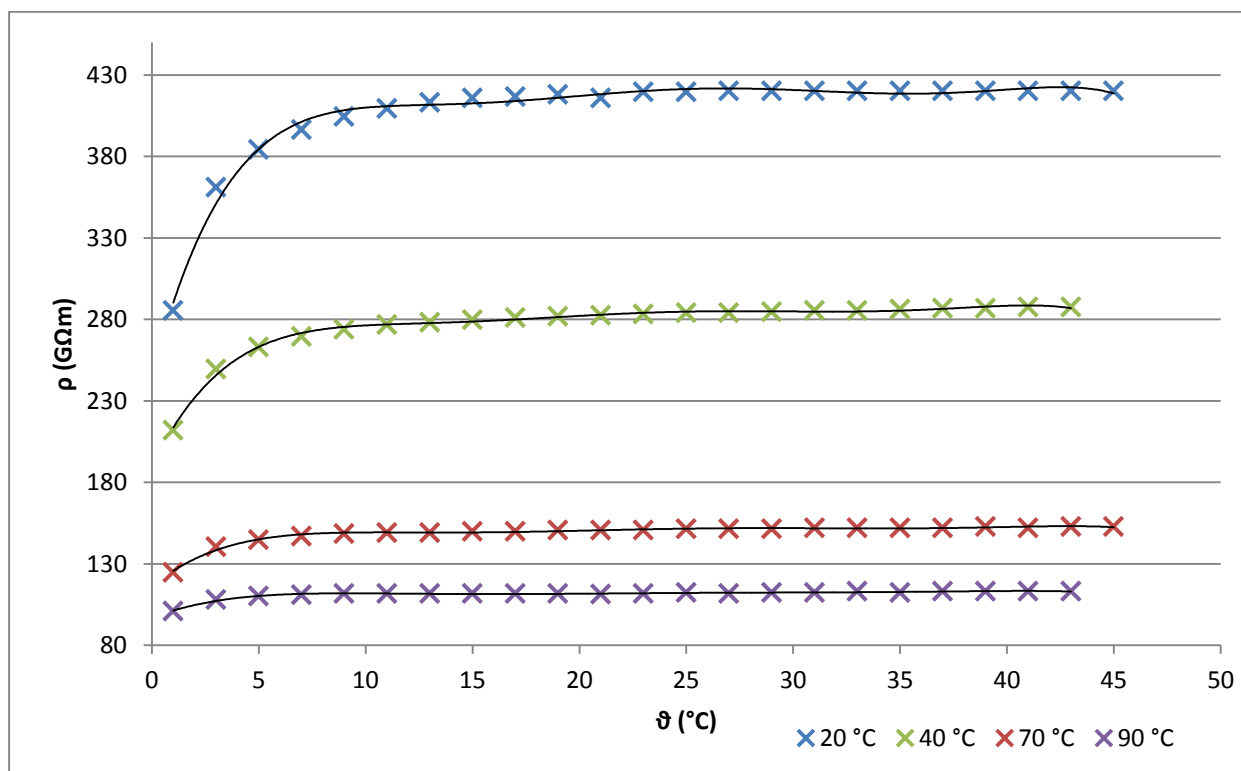
Relativní permitivita je nezávislá na napětí v celém měřeném rozsahu napětí i teplot. Měřená data, která to potvrzují, jsou v příloze. Rezistivita oleje při 90 °C je 13,5 GΩm.

Změřený minerální olej je podle definice normy ČSN EN 60422 „dobrý“. Tedy pokud by tento konkrétní olej byl v provozu, nebylo by nutné zvětšovat četnost rutinních kontrol. Olej by vyhovoval jak pro výkonové transformátory nad 170 kV, tak i pro přístrojové transformátory do 170 kV. Pro přístrojové transformátory nad 170 kV už by olej byl v kategorii „vyhovující“, což znamená, že by se měla zvednout četnost rutinních kontrol oleje, ale pořád by nebyla potřeba ho měnit.

Druhý měřený vzorek oleje byl silikonový olej. U oleje jsem měřil jak závislost sledovaných parametrů na napětí pro čtyři různé teploty, tak i vliv teploty na polarizační mechanismy uvnitř oleje. Závislost parametrů na napětí má stejný trend jako u minerálního oleje. Co se týče polarizačních mechanismů uvnitř oleje, tak jejich průběh lze vidět na obrázku 5.16. Podmínky měření objemové rezistivity silikonového oleje lze nalézt v tabulce 5.7.

Tab. 5.7: Podmínky měření silikonového oleje

Podmínky měření		
Napětí	1000	V
Teplota vzorku	20; 40; 70; 90	°C
Relativní vlhkost	23	%
Čas měření	60	s
Čas zkratování	60	s



Obr. 5.16: Vliv teploty na polarizační děje v silikonovém oleji

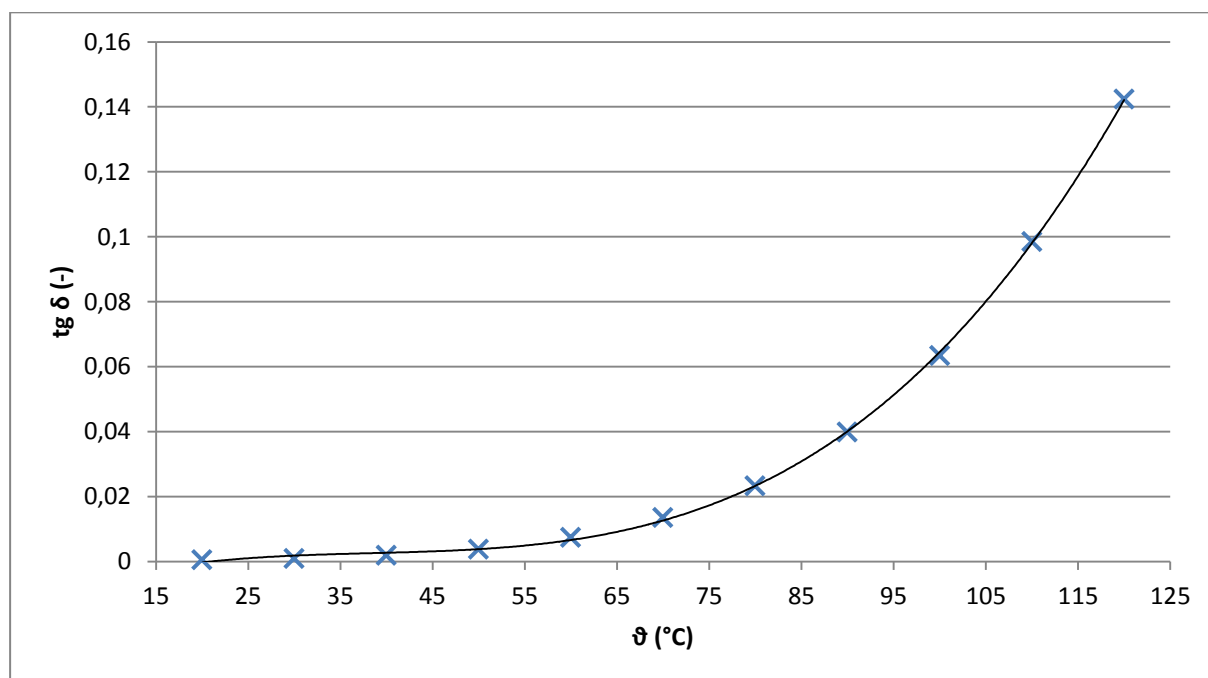
Změřená data odpovídají teoretickým předpokladům, že se zvyšující se teplotou bude rezistivita oleje klesat a polarizační procesy se budou zkracovat. Zmenšení rezistivity při vyšších teplotách je zapříčiněno lepší pohyblivostí volných nabitých částic uvnitř objemu oleje. Co se týče délky polarizačních dějů při vyšších teplotách, tak to je způsobeno tím, že se zvyšující se teplotou klesá viskozita oleje a tím pádem se molekuly oleje snadněji natáčí ve směru působícího stejnosměrného napětí.

Jako poslední bylo měření teplotní závislosti sledovaných parametrů esterového oleje. Měřený rozsah teploty byl od 20 °C do 120 °C. Podmínky měření teplotních závislostí esterového oleje jsou uvedeny v tabulce 5.8.

Tab. 5.8: Podmínky měření esterového oleje

Podmínky měření		
Napětí	1500	V
Frekvence	50	Hz
Relativní vlhkost	22,10	%
Napěťové namáhání	0,75	kV/mm

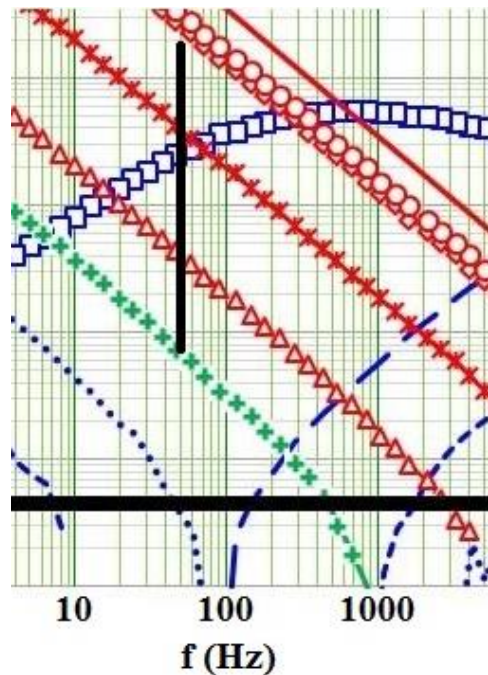
Na obrázku 5.17 lze vidět teplotní závislost ztrátového činitele esterového oleje Midel 7131.



Obr. 5.17: Závislost ztrátového činitele na teplotě pro esterový olej

Je vidět, že závislost má exponenciální tvar. Při porovnání mnou měřené charakteristiky s charakteristikou změřenou v publikaci [30] lze pozorovat, že se charakteristiky shodují. Z toho lze usoudit, že měření bylo provedeno správně a získaná data jsou korektní. Na obrázku 5.18 je vidět porovnání charakteristik. Mnou měřená závislost je do závislosti z publikace [30] (obrázek 5.18) naznačená černě. Na obrázku 5.18 je vidět, že moje závislost je přímka, zatím co v obrázku 5.17 je moje závislost exponenciální. To je způsobeno tím, že v publikaci [30] jsou charakteristiky v logaritmickém měřítku – exponenciála v logaritmické ose je přímka. Mojí charakteristiku potvrzuje také to, že jednotlivé vzdálenosti mezi

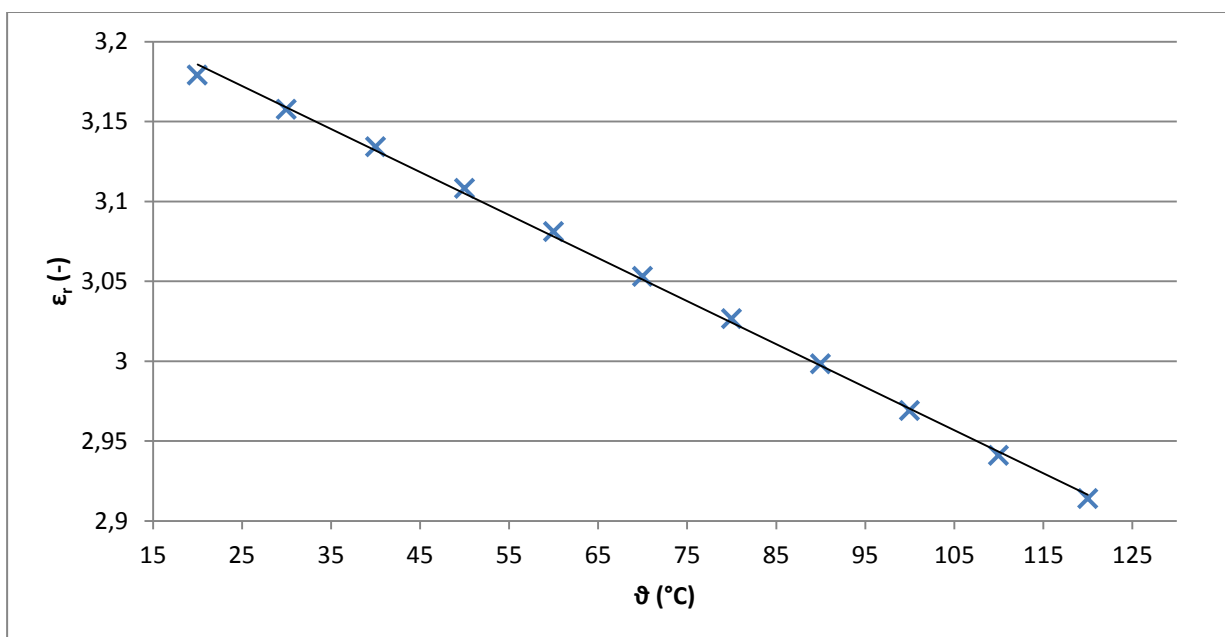
jednotlivými závislostmi jsou exponenciální (rozdíl vzdálenosti mezi první a druhou charakteristikou je cca dvakrát menší než rozdíl vzdálenosti mezi druhou a třetí charakteristikou).



Obr. 5.18: Porovnání mnou změřených dat s daty z publikace [30]

Na obrázku 5.18 je zelená charakteristika měřená při teplotě vzorku 25 °C, charakteristika označená symbolem trojúhelníku je měřená při teplotě 50 °C, červená charakteristika s křížky byla měřena při teplotě vzorku 100 °C.

Co se týče závislosti relativní permitivity na teplotě pro esterový olej, tak tu lze vidět na obrázku 5.19.



Obr. 5.19: Závislost relativní permitivity na teplotě pro esterový olej

Jak je vidět, charakteristika má klesající trend, to je způsobeno tím, že při zvětšující se teplotě se objem kapaliny zvětšuje a tím se zvětšují i vzdálenosti mezi jednotlivými molekulami, které se tím pádem méně ovlivňují. Také tady je dokázána platnost předpokladu z kapitoly 2.4, že s rostoucí teplotou bude relativní permitivita klesat.

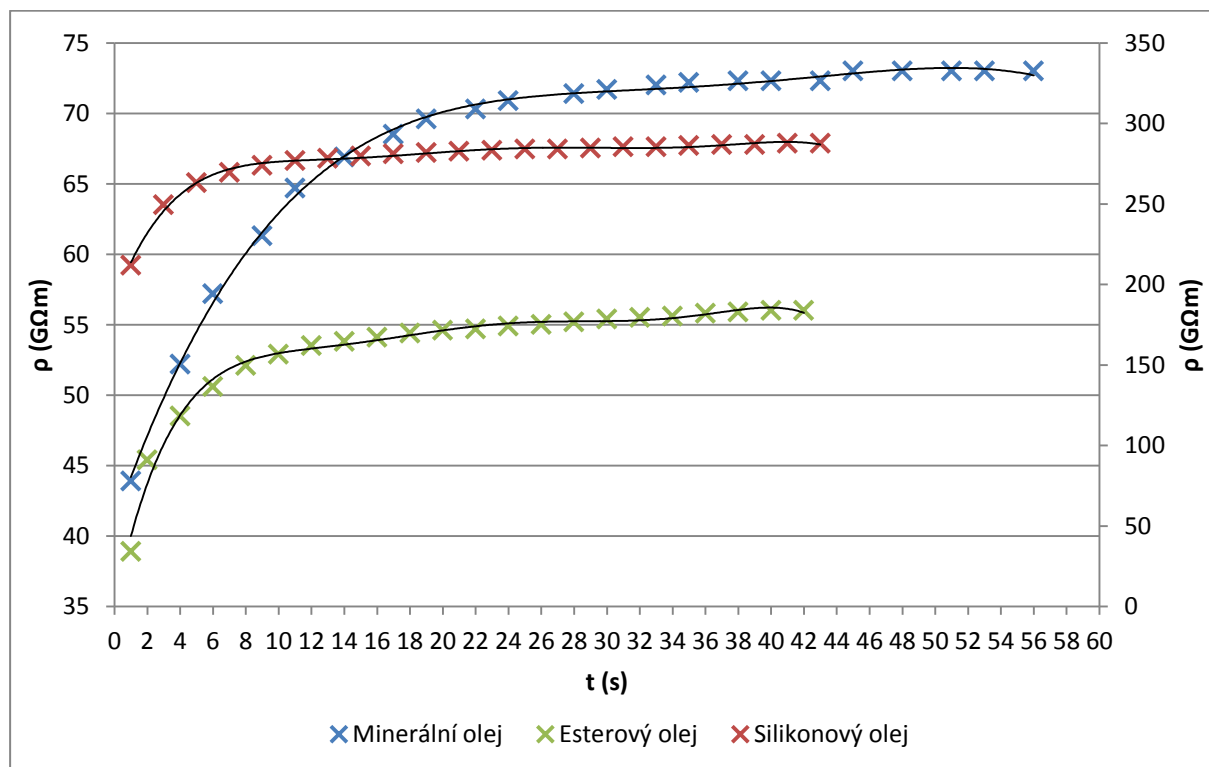
5.4.4.1 Porovnání olejů

V tabulce 5.9 jsou uvedeny podmínky měření objemové rezistivity pro všechny tři oleje, aby bylo možné výsledné průběhy mezi sebou vzájemně porovnat.

Tab. 5.9: Podmínky měření rezistivity olejů

Podmínky měření		
Napětí	1000	V
Relativní vlhkost	23,5	%
Čas měření	60	s
Čas zkratování	60	s
Teplota vzorku	40	°C
Objem vzorku	40	ml

Na obrázku 5.20 je vidět měřené průběhy polarizačních mechanismů ve všech třech olejích.



Obr. 5.20: Průběh polarizačních dějů v různých kapalných dielektrikách

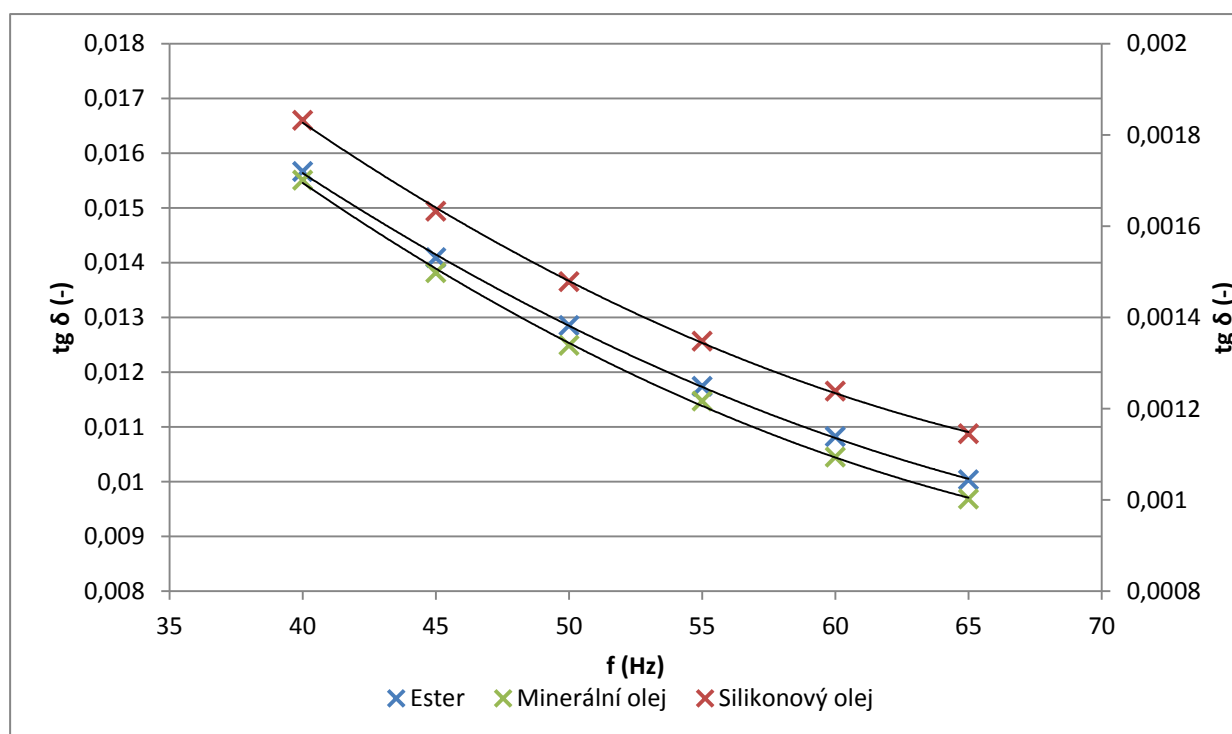
- červená charakteristika je na vedlejší ose

Z obrázku 5.20 je patrné, že minerální olej má nejdelší polarizační procesy. Za ním následuje esterový olej a nejrychlejší polarizační procesy má silikonový olej. Podle předpokladů by měl mít nejdelší polarizační procesy esterový olej, jelikož má největší viskozitu a molekuly v objemu oleje musí vynaložit více práce, aby se natočily ve směru působícího elektrického pole. Nicméně grafu je patrné, že nejdelší polarizační proces má minerální olej. To může být způsobeno nečistotami v oleji, jelikož je 5 let starý.

V další části jsem porovnával vliv frekvence na ztrátový činitel a relativní permitivitu všech tří olejů. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázku 5.21. Podmínky měření lze nalézt v tabulce 5.10.

Tab. 5.10: Podmínky měření frekvenční závislosti

Podmínky měření		
Napětí	1000; 1500	V
Napětové namáhání	0,5	kV/mm
Teplota vzorku	70	°C
Objem vzorku	40	ml



Obr. 5.21: Vliv změny frekvence na ztrátový činitel testovaných olejů

- **červená charakteristika je na vedlejší ose**

Z charakteristik je patrné, že vliv frekvence je na všechny tři oleje v měřeném rozsahu stejný. Charakteristiky odpovídají charakteristikám v publikaci, [19] kde se autoři zabývali vlivem změny frekvence na minerální olej, a taky v publikaci, [30] která se věnovala vlivům frekvence na silikonový olej. V měřeném rozsahu frekvencí se hodnota relativní permitivity nemění pro všechny tři oleje, její hodnota je konstantní. Měřená data k tomuto tvrzení lze nalézt v příloze B, C, D. A také to potvrzují grafy publikované v [19] a [30].

6 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byly změřeny elektrické parametry dielektrických materiálů dostupných v laboratoři vysokého napětí. Mezi pevná dielektrika měřená v rámci praktické části patří polyetylény. Jednalo se jak o čistý polyetylén, tak i o polyetylény s různými příměsemi. Mezi příměsi, které lze nalézt ve vzorcích, byla jak různá barviva, která mají za úkol výslednou směs polyetylénu obarvit, tak i různé retardanty hoření, které zpomalují nebo zcela tlumí hoření kabelů. V měřených závislostech lze vidět vliv těchto příměsí na elektrické parametry polyetylénu. Lze konstatovat, že příměsi zhoršují tyto elektrické vlastnosti. Čistý polyetylén s označením HE 6063 měl hodnotu ztrátového činitele pod $1 \cdot 10^{-4}$ což splňuje předpoklad hodnot z literatury [8]. Co se týče polyetylénů s barvivem RED PEZ 340185Q a retardantem Y7108-FT-50FR, tak ty měly hodnotu ztrátového činitele na hranici $1 \cdot 10^{-4}$ a lze ještě říct, že splňují kritérium dané literaturou [8]. Tyto druhy PE jsou používány jako plášťové směsi pro VN kabely. Polyetylén s označením Borealis LE 4423 s katalyzátorem 4476 měl při 25 °C hodnotu ztrátového činitele nad $6 \cdot 10^{-4}$, při teplotě 80 °C měl hodnotu pod $4 \cdot 10^{-4}$. Jako jediný z měřených vzorků se tento používá jako izolační médium. Co se týče kompozitu retardantu ECOOH 5555 a barviva 2001OR-50, tak ten měl při 25 °C hodnotu ztrátového činitele 0,01 a při 80 °C byl nad hodnotou 0,1. Relativní permitivitu měly všechny vzorky kromě kompozitní sloučeniny kolem hodnoty 2,2, tedy v rozmezí, které uvádí pramen [8]. Kompozitní sloučenina měla relativní permitivitu v rozmezí 3,76 až 3,9. V měřeném rozmezí teplot.

Další vzorky pevných dielektrik použitých pro měření byly čtyři druhy PVC. U těchto vzorků nebyly měřeny žádné závislosti, ale jen jejich parametry při teplotě 70 °C. Tato teplota byla zvolena z důvodu, že veškeré normy uvádí parametry PVC právě při této teplotě. Veškeré měřené vzorky vyhověly podnikové normě energetiky PNE 34 7659-3 na velikost objemové rezistivity. Norma uvádí, že PVC izolace NN kabelu musí mít nejméně 100 MΩm. Nejmenší rezistivitu měl vzorek s označením IS9-622, a to 129,56 MΩm. Největší měl vzorek s označením IS9-610, a to 3080 MΩm. Oba tyto vzorky jsou používány jako izolační směsi. Používají se tedy jako izolační médium v NN kabelech. Co se týče hodnot ztrátového činitele měřených vzorků, tak až na vzorek s označením IS9-610 měly všechny vzorky ztrátový činitel o řád větší, než jaký uvádí pramen [8]. Vzorek IS9-610 má hodnotu ztrátového činitele 0,0712, zatímco vzorek IS9-622 měl hodnotu ztrátového činitele 0,522. Pramen [8] uvádí, že čisté PVC má hodnotu ztrátového činitele cca 0,02 a měkčené PVC cca 0,05.

Jako poslední vzorky pevných dielektrik byly měřeny různé druhy papírů. Nejmenší hodnotu ztrátového činitele měl kompozit papír-guma. Je otázkou, zda lze tento vzorek považovat za papír a porovnávat ho s ostatními papíry. Nicméně hodnotu ztrátového činitele měl 0,065, relativní permitivitu 3,14 a objemovou rezistivitu 31,1 GΩm. Vysokou hodnotu rezistivity zapříčiňuje právě guma, která je nanášena na papíru. To samé platí o ztrátovém činiteli. Mezi další vzorky patří kartón, který má hodnotu ztrátového činitele 0,4314. Tak vysokou hodnotu zapříčiňuje to, že tento kartón je vyroben z recyklátu, který obsahuje všechny možné nečistoty, které zhoršují ztrátový činitel. Relativní permitivitu má kartón 3,45. V rámci měření byla ověřena teorie, že kartón impregnovaný olejem, jak silikonovým tak minerálním je sériová kombinace relativní permitivity kartónu a oleje. Relativní permitivita kartónu impregnovaného minerálním olejem je 5,141 a kartónu impregnovaného silikonovým

olejem je 5,734. Relativní permitivita použitého minerálního oleje, je 2,211 a silikonového oleje 2,714. Součtem permitivity kartónu a oleje se přibližně dostaneme na hodnotu, která byla změřena při měření kartónu napuštěného olejem. Odchylka při použití minerálního jako impregnačního média je cca 0,5, u silikonového oleje je tato odchylka cca 0,4.

Z kapalných dielektrik byly měřeny tři druhy olejů, a to minerální, silikonový a esterový olej. U silikonového a minerálního oleje bylo provedeno měření závislosti ztrátového činitele a relativní permitivity na napětí. Z charakteristik vyplynulo, že změna napětí nemá skoro žádný vliv na hodnotu ztrátového činitele. U minerálního oleje lze pozorovat vliv změny napětí na třetím desetinném místě. U silikonového oleje lze tuto změnu pozorovat až na pátém desetinném místě. Minerální olej má při 90 °C a 1500 V hodnotu ztrátového činitele cca 0,022, silikonový olej při stejných podmínkách cca 0,00039. Co se týče relativní permitivity obou olejů, tak změna napětí nemá vliv na její hodnotu. Minerální olej má relativní permitivitu 2,511, silikonový olej 2,131. Esterový olej má při 90 °C a 1500 V hodnotu ztrátového činitele 0,0399 a relativní permitivitu 2,99. Z dat je patrné, že i když je silikonový olej cca 5 let starý, tak má daleko menší ztrátový činitel než nový esterový olej. Dokonce i minerální olej, který je cca stejného stáří jako silikonový olej má lepší ztrátový činitel než esterový olej. Na olejích byla měřena také jejich objemová rezistivita. Minerální olej má rezistivitu při 90 °C 13,5 GΩm, silikonový olej má rezistivitu 113,19 GΩm a esterový olej jen 3,5 GΩm. Z výsledků je patrné, že esterový olej se nejeví jako nejlepší náhrada za minerální olej, má v porovnání se starým minerálním oleje větší ztráty a také podstatně nižší objemovou rezistivitu. Je otázkou jaké parametry má nový minerální olej, ale podle předpokladu je bude mít ještě lepší než olej starý. Nicméně esterové oleje jsou nezávadné, neškodí přírodě, o což v poslední době jde především. Jako nejlepší náhrada se z mého pohledu jeví silikonový olej se svými parametry. I starší olej má daleko nižší ztrátový činitel než ester a má přibližně 4 krát větší objemovou rezistivitu než ester.

Co se týče chyb měření, tak u pevných dielektrik je největší chyba spojena s tloušťkou vzorku. Jelikož vzorky nejsou po celé ploše stejně tlusté, nelze do měřicího přístroje zadat přesnou tloušťku, ale jen průměrnou hodnotu měřenou v několika místech vzorku. Tuto chybu lze minimalizovat tím, že tloušťku vzorku změříme v co nejvíce místech. Další, co může generovat chybu měření je to, že vrchní elektroda nebude na vzorek přitlačena pod úhlem 90 ° a bude jakoby nakloněná, což zapříčiní, že jedna její část bude více zabořená do vzorku, a tím pádem dojde k jinému rozložení elektrického pole podél vzorku. Tuto chybu lze odstranit pečlivým přitlačováním vrchní elektrody. U kapalných dielektrik se největší chyba zanáší při aplikaci oleje do buňky. Olej se nejdříve natáhne do stříkačky a už to samotné v něm produkuje bublinky. Olej se následně stříkne do buňky skrz otvor zobrazen na obrázku 6.1, tímto stříknutím oleje do buňky dochází k zpěnění oleje uvnitř buňky, což má za následek nepřesnosti měření neboť se v oleji nacházejí vzduchové bublinky. Tento problém s bublinkami uvnitř objemu oleje lze odstranit tím, že po aplikaci oleje by se nechal olej delší dobu stát, aby mohly bublinky vystoupat nahoru. Čím viskóznější olej je, tím delší dobu je nutno čekat.



Obr. 6.1: Otvor pro aplikaci oleje do buňky

Moje postřehy během měření pevných dielektrik jsou takové, že nebyla by škoda, kdyby buňka Tettex 2913 pro pevná dielektrika měla nějaké chlazení elektrod, jelikož když se měří teplotní závislost jednoho vzorku a pak je potřeba měřit teplotní závislost druhého vzorku tak je nutné čekat značnou dobu, než elektrody vychladnou. Co se týče buňky Tettex 2903 pro kapalná dielektrika tak způsob aplikace oleje považuji za nedokonalý. Také mi přijde nebezpečné, že pokud se měří teplotní závislosti, tak se ohřívá celá nerezová část (ta která je zobrazena na obrázku 6.1). Při měření vysokých teplot může dojít k popálení osoby, která měření provádí. Také se vyhřívá koncovka kabelu, kterým jsou měřená data posílána do procesní jednotky. Je otázka, co to udělá s její životností, když bude tato koncovka vystavována vysokým teplotám pravidelně.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] - MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] - *Fundamental Physical Constants from NIST* [online]. Dostupné z: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>
- [3] - *Katedra fyziky Přf OU* [online]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/fypx2/prednasky/FYPY2_2.pdf
- [4] - HOFMANN, J. a M. URBANOVÁ. *Fyzika I* [online]. 2005, Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_ekniha-001/pdf/227.pdf
- [5] - DUBSKÝ, Jan a Libor KŘÍŽANOVSKÝ. *Základy teorie dielektrik*. Praha: SNTI, 1967.
- [6] - ČSN EN 62631-1. *Česká technická norma: Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů*. 2012.
- [7] - *Studijní materiály* [online]. Dostupné z: <http://stanley.8u.cz/skola/data/ze/Relativn%C3%AD%20permitivita,ztr%C3%A1tov%C3%BD%20%C4%8Dinitel,ztr%C3%A1tov%C3%A9%20%C4%8D%C3%ADslo.doc>
- [8] - ARTBAUER, Ján, Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *IZOLANTY A IZOLÁCIE*. Bratislava: ALFA, 1969.
- [9] - POLJAK, František. *ŠTRUKTÚRA A VLASTNOSTI MATERIÁLOV II: Izolanty a dielektriká*. Bratislava: SVŠT, 1986.
- [10] - ČSN IEC 250. *Česká technická norma: Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek*. 1998.
- [11] - *Operating instructions: Precision oil and solid dielectric analyzer 2830/2831*. Version 2.0. Switzerland: HAEFELY TEST, 2013.
- [12] - *Test cell for solid insulants 2914*. HAEFELY HIPOTRONICS.
- [13] - *Test cell liquid insulants 2903*. HAEFELY HIPOTRONICS.
- [14] - MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály: Izolanty a dielektrika* [online]. 2016, Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [15] - F. Guastavino, A. Ratto, F. Porcile, E. Torello and D. Santinelli, "Dielectric characterization of gas mixtures as electrical insulating for high voltage components and appliances," *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Shenzhen, 2013, pp. 1008-1011. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6748295&isnumber=6747062>

- [16] - Server *Ozeas: Studijní materiály* [online]. Dostupné z: ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/34%20%20Kapaln%20izolanty%20a%20dielektrika.doc
- [17] - K. Jariyanurat, S. Maneerot, P. Nimsanong, P. Kitcharoen, P. Chaisiri and N. Pattanadech, "Dielectric properties of mineral oil compared with natural ester," *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, 2017, pp. 1-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8124716&isnumber=8124591>
- [18] – Yuan Zhou, Miao Hao, G. Chen, G. Wilson and P. Jarman, "Frequency-dependence of conductivity of new mineral oil studied by dielectric spectroscopy," *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, 2012, pp. 634-637. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6357099&isnumber=6356989>
- [19] – P. K. Poovamma, T. R. A. Ahmed, C. Viswanatha, K. Mallikarjunappa and A. Sudhindra, "Evaluation of transformer oil by Frequency domain technique," *2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, Futuroscope-Chasseneuil, 2008, pp. 1-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4622491&isnumber=4622446>
- [20] - HASSDENTEUFEL, Josef, et al. *Elektrotechnické materiály*. 2. Vydání. Bratislava :Alfa, 1978. 607 s. ISBN 63-555-78.
- [21] – JAHN, M. *Dielektrické vlastnosti kapalných izolantů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 142 s.
- [22] – BANSKÝ, J a M SOMORA. *Materiály a technológia I*. Košice: Alfa, 1982.
- [23]- J. Crine, "Silicone oil as replacement fluid for PCBs in transformers," in *Canadian Electrical Engineering Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 110-113, July 1986. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6594046&isnumber=6451959>
- [24] – Suwarno and M. A. Darmawan, "Effect of water content on dielectric properties and partial discharge characteristics of silicone oil," *2016 3rd Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, Yogyakarta, 2016, pp. 125-129. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7904852&isnumber=7904837>
- [25] – Liu Qichang, Wan Ronggen, Wang Yougong and Chang Xianmin, "The study of the dielectric loss behavior of phenyl methyl silicone oil," *1987 Ninth International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, Salford, 1987, pp. 198-202. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7408832&isnumber=7408794>
- [26] - K. Bandara, C. Ekanayake and T. K. Saha, "Compare the performance of natural ester with synthetic ester as transformer insulating oil," *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Sydney, NSW, 2015, pp. 975-978. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7295437&isnumber=7295193>

- [27] - I. Fafana, V. Wasserberg, H. Borsil and E. Gockenbach, "Retrofilling conditions of high voltage transformers," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, no. 2, pp. 17-30, March-April 2001. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=917528&isnumber=19819>
- [28] – U. Mohan Rao, Yog Raj Sood & Raj Kumar Jarial (2017) Ester Dielectrics: Current Perspectives and Future Challenges, *IETE Technical Review*, 34:4, 448-459, Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1202088>
- [29] – M. H. A. Hamid, M. T. Ishak, M. F. M. Din, N. S. Suhaimi and N. I. A. Katim, "Dielectric properties of natural ester oils used for transformer application under temperature variation," *2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Melaka, 2016, pp. 54-57. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7951472&isnumber=7951457>
- [30] – J. Muslim, R. Hanna, O. Lesaint, J. L. Reboud and N. I. Sinisuka, "Electrical characterization of synthetic ester liquid over wide temperature range ($-60^{\circ}\text{C} / 200^{\circ}\text{C}$)," *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, 2017, pp. 1-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8124711&isnumber=8124591>
- [31] - *MIDEL 7131 Synthetic Ester Transformer Fluid: Product Guide*. UK: MIDEL. Dostupné z: <https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Midel%20Product%20Guide%20Low%20Res%20SN.pdf>
- [32] - *Dielectric Insulating Fluid Overview: Product Guide*. UK: MIDEL, 2010. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/154478438/MIDEL-7131-Dielectric-Insulating-Fluid-Overview>
- [33] – KITOUNI, S. *Dielectric Properties of Triaxial Porcelain Prepared Using Raw Native Materials Without Any Additions*. BAJECE, 2014. ISSN 2147-284X. Dostupné z: <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/39718>
- [34] – W. H. Barney and J. D. Hoffman, "Dielectric behavior of glasses and glass-ceramics," *1962 EI Electrical Insulation Conference Materials and Application*, Washington, DC, 1962, pp. 82-84. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7456048&isnumber=7456020>
- [35] – N. Fuse, T. Tanaka and Y. Ohki, "Evaluation of dielectric properties in polypropylene/clay nanocomposites," *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, VA, 2009, pp. 507-510. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5377891&isnumber=5377697>
- [36] – TANČOUZ, T Vliv UV záření na kabelovou izolaci. Plzeň: Západočeská univerzita, 2017. 71s.

- [37] – C. P. Sugumaran, "Diagnosis on mechanical and electrical properties of cable insulation PVC with nanofiller," *2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, Kolkata, 2013, pp. 223-226. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6737502&isnumber=6737459>
- [38] - ČSN IEC 93. *Česko-Slovenská norma: Metody meradia vnútornej rezistivity a povrchovej rezistivity tuhých elektroizolačných materiálov*. Druhé vydanie. 1993.
- [39] - Akreditovaná zkušební laboratoř č. 1226. *Elektrotechnická diagnostika izolačních systémů* [online]. Dostupné z: <https://www.eldiag.cz/vzorkovani-izolacniho-oleje/>
- [40] - PNE 35 1634. *Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie: Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Manipulace s fluoridem sírovým (SF6) a jeho použití ve vysokonapěťových spínacích a řídicích zařízeních*. Druhé vydání. 2010.
- [41] - PNE 34 7625. *Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie: VN kabely se zesítěnou PE izolací pro distribuční sítě do 35 kV*. Páté vydání. 2017.
- [42] - PNE 34 7659-3. *Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie: Kabely plastové pro distribuční sítě o jmenovitém napětí 0,6/1 kV - Oddíl 3: Kabely s PVC izolací bez koncentrického jádra*. 2006.
- [43] - PNE 34 7659-5A. *Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie: Kabely plastové pro distribuční sítě o jmenovitém napětí 0,6/1 kV - Oddíl 5: Kabely s XLPE izolací bez koncentrického jádra*. 2006.
- [44] - ČSN EN 60422. *Česká technická norma: Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních - Návod pro kontrolu a údržbu*. Druhé vydání. 2013.
- [45] - ČSN EN 60247. *Česká technická norma: Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele a rezistivity při stejnosměrném napětí*. 2005.
- [46] - ČSN IEC 60502-2. *Česká technická norma: Kabely s výtlačně lisovanou izolací a jejich příslušenství pro jmenovitá napětí od 1 kV do 30 kV - Část 2: Kabely pro jmenovitá napětí od 6 kV do 30 kV*. 2019.
- [47] - ČSN EN 61099. *Česká technická norma: Izolační kapaliny - Specifikace nepoužitých syntetických organických esterů pro elektrotechnické účely*. Druhé vydání. 2011.

PŘÍLOHY

Příloha A – zpracovaná data k PE

Tabulky zpracovaných hodnot závislosti ztrátového činitele a relativní permitivity na teplotě.

100 % PE					98 % PE s 2 % barvivem RED PEZ 340185Q				
ϑ (°C)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka	ϑ (°C)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka
25	6,1E-05	3,1E-06	2,218	0	25	9,8E-05	3,2E-06	2,1718	0,0002
30	5,9E-05	2,3E-06	2,2148	0,0002	30	0,0001	1,7E-06	2,169	0
35	5,9E-05	2,6E-06	2,212	0,00032	35	0,00011	1,1E-06	2,166	0
40	5,6E-05	4E-07	2,2084	0,0004	40	0,00011	2,1E-06	2,163	0
45	5,3E-05	2E-06	2,2052	0,00037	45	0,0001	2,1E-06	2,1594	0,00024
50	4,8E-05	3E-06	2,2002	0,00058	50	9,6E-05	3E-06	2,15	0
55	4,5E-05	2,6E-06	2,1928	0,00058	55	8,6E-05	2,9E-06	2,1454	0,00024
60	3,3E-05	1,5E-06	2,1864	0,00051	60	7,8E-05	2,2E-06	2,136	0
65	3,7E-05	2,4E-06	2,1784	0,0004	65	6,9E-05	2,4E-06	2,129	0,00045
70	3,7E-05	1,9E-06	2,1676	0,0006	70	6,7E-05	2,9E-06	2,121	0,00084
75	3,4E-05	2,7E-06	2,1584	0,00087	75	6,3E-05	3E-06	2,1094	0,00024
80	3,1E-05	2,9E-06	2,1476	0,00093	80	6,5E-05	8,4E-07	2,095	0

92 % PE s 8 % retardant Y7108-FT-50FR					98 % PE s 2 % barvivo 2001-OR-50				
ϑ (°C)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka	ϑ (°C)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka
25	0,00011	3,2E-06	2,214	0	25	0,01054	5,5E-06	3,9294	0,00024
30	0,00011	1,3E-06	2,2148	0,0002	30	0,01148	4,5E-06	3,9258	0,0002
35	0,00012	2,3E-06	2,213	0	35	0,01362	6,8E-06	3,918	0
40	0,00011	1,5E-06	2,204	0	40	0,01685	2,7E-05	3,916	2,2E-16
45	0,00011	2E-06	2,2048	0,0002	45	0,02085	2,9E-05	3,8952	0,0002
50	0,0001	2E-06	2,195	0	50	0,02648	4,3E-05	3,883	0,00032
55	9,8E-05	2,7E-06	2,188	0	55	0,03365	7,5E-05	3,8528	0,00073
60	9,6E-05	1,9E-06	2,177	0	60	0,0434	1,7E-05	3,8258	0,00037
65	9,1E-05	2E-06	2,1692	0,0002	65	0,05473	0,00013	3,7906	0,00129
70	8,7E-05	3,1E-06	2,163	0,00032	70	0,06815	0,00152	3,7686	0,00312
75	7,8E-05	9,7E-07	2,1546	0,0004	75	0,08685	0,00022	3,7802	0,00111
80	7,8E-05	1,4E-06	2,145	0	80	0,10828	0,00025	3,8036	0,0006

95 % PE s 5 % katalyzátor 4476				
ϑ (°C)	tg δ (-)	Odchylka	ε_r (-)	Odchylka
25	0,00064	2,2E-06	2,246	0
30	0,00053	2,8E-06	2,244	0
35	0,0004	1,1E-06	2,237	0
40	0,00031	2E-07	2,23	0
45	0,00025	7,1E-07	2,221	0
50	0,00024	0	2,2124	0,00024
55	0,00025	5,1E-07	2,198	0
60	0,00025	4E-07	2,186	0
65	0,00024	3,8E-06	2,1714	0,00024
70	0,00025	1,1E-06	2,1558	0,0002
75	0,00029	5,1E-07	2,137	0,00032
80	0,00038	5,8E-07	2,115	0

Příloha B – zpracovaná data k minerálnímu oleji

Tabulky zpracovaných dat k napěťovým závislostem.

U (V)	tg δ (-)	Odchylka	ε_r (-)	Odchylka	U (V)	tg δ (-)	Odchylka	ε_r (-)	Odchylka
200	0,001908	6,78E-07	2,211	0	200	0,004565	5,12E-06	2,187	0
300	0,001918	3,74E-07	2,211	0	300	0,004624	1,22E-06	2,187	0
400	0,001931	5,83E-07	2,211	0	400	0,004678	5,1E-07	2,187	0
500	0,001948	2,11E-06	2,211	0	500	0,004721	5,32E-06	2,187	0
600	0,001968	1,59E-06	2,211	0	600	0,004782	1,28E-06	2,187	0
700	0,00199	7,07E-07	2,211	0	700	0,004831	3,74E-07	2,187	0
800	0,002006	1,07E-06	2,211	0	800	0,004868	8,12E-07	2,187	0
900	0,002028	5,83E-07	2,211	0	900	0,004904	2E-07	2,187	0
1000	0,002056	5,9E-06	2,211	0	1000	0,004937	3,74E-07	2,187	0
1100	0,002068	5,1E-07	2,211	0	1100	0,004992	8,6E-07	2,187	0
1200	0,002088	5,83E-07	2,211	0	1200	0,005045	7,07E-07	2,187	0
1400	0,002128	7,56E-06	2,211	0	1400	0,005128	9,27E-07	2,187	0
1600	0,002162	1,39E-06	2,211	0	1600	0,005217	4E-07	2,187	0
1800	0,002203	9,7E-07	2,211	0	1800	0,005297	0	2,187	0
2000	0,002296	4,86E-05	2,211	0	2000	0,005458	1,25E-06	2,187	0

U (V)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka	U (V)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka
200	0,012372	2E-06	2,153	0	200	0,02026	3,16E-06	2,131	0
300	0,012496	2,45E-06	2,153	0	300	0,02048	0	2,131	0
400	0,012624	2,45E-06	2,153	0	400	0,020642	2E-06	2,131	0
500	0,012754	2,45E-06	2,153	0	500	0,020816	2,45E-06	2,131	0
600	0,012878	5,83E-06	2,153	0	600	0,020456	0,000218	2,131	0
700	0,01299	8,67E-19	2,153	0	700	0,02116	0	2,131	0
800	0,01309	0	2,153	0	800	0,021318	2E-06	2,131	0
900	0,01318	0	2,153	0	900	0,021474	2,45E-06	2,131	0
1000	0,01327	0	2,153	0	1000	0,021628	2E-06	2,131	0
1100	0,013346	2,45E-06	2,153	0	1100	0,02176	0	2,131	0
1200	0,01341	0	2,153	0	1200	0,02189	0	2,131	0
1400	0,013578	2E-06	2,153	0	1400	0,022142	2E-06	2,131	0
1600	0,01375	8,67E-19	2,153	0	1600	0,0224	0	2,131	0
1800	-	-	-	-	1800	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	2000	-	-	-	-

Tabulky zpracovaných dat k rezistivitě.

40 °C				90 °C			
t (s)	U (V)	I (nA)	ρ (G Ω m)	t (s)	U (V)	I (nA)	ρ (G Ω m)
1	1096	181	43,9	1	1091	666	11,86
4	1095	152	52,2	4	1092	661	11,93
6	1095	138	57,2	6	1092	639	12,4
9	1095	129	61,3	9	1092	624	12,7
11	1095	122	64,7	11	1092	617	12,8
14	1095	118	66,9	14	1093	614	12,9
17	1095	116	68,5	17	1092	607	13
19	1095	114	69,6	19	1093	604	13,1
22	1095	113	70,3	22	1093	604	13,1
24	1094	112	70,9	24	1093	601	13,2
28	1095	111	71,4	28	1093	601	13,2
30	1095	110	71,7	30	1094	598	13,2
33	1095	110	72	33	1093	597	13,2
35	1095	110	72,2	35	1094	595	13,3
38	1095	109	72,3	38	1093	594	13,3
40	1095	109	72,3	40	1094	591	13,4
43	1095	109	72,3	43	1093	591	13,4
45	1094	108	73	45	1094	591	13,4
48	1095	108	73	48	1093	588	13,5
51	1095	108	73	51	1093	588	13,5
53	1094	108	73				
56	1094	108	73				

Tabulka zpracovávaných dat k vlivu frekvence.

f (Hz)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka
40	0,015506	5,1E-06	2,153	0
45	0,013816	5,1E-06	2,153	0
50	0,012486	2,45E-06	2,153	0
55	0,011472	8,2E-05	2,153	0
60	0,01045	4,47E-06	2,153	0
65	0,009679	1,07E-06	2,153	0

Příloha C – zpracovaná data k silikonovému oleji

Tabulky zpracovaných hodnot rezistivity.

25 °C				40 °C			
t (s)	U (V)	I (nA)	ρ (G Ω m)	t (s)	U (V)	I (nA)	ρ (G Ω m)
1	1093	28	285,49	1	1093,00	37,00	211,96
3	1093	22	361,19	3	1093,00	32,00	249,45
5	1093	21	384,26	5	1093,00	30,00	263,14
7	1093	20	396,52	7	1093,00	29,00	269,63
9	1093	19	404,45	9	1093,00	29,00	273,96
11	1093	19	409,49	11	1093,00	28,00	276,84
13	1093	19	413,1	13	1093,00	28,00	278,28
15	1093	19	415,98	15	1093,00	28,00	279,72
17	1093	19	416,7	17	1093,00	28,00	281,17
19	1093	19	418,15	19	1093,00	28,00	281,89
21	1093	19	415,87	21	1093,00	28,00	282,61
23	1093	19	419,59	23	1093,00	28,00	283,33
25	1093	19	419,59	25	1093,00	28,00	284,05
27	1093	19	420,31	27	1093,00	28,00	284,05
29	1093	19	420,31	29	1093,00	28,00	284,77
31	1093	19	420,31	31	1093,00	28,00	285,49
33	1093	19	420,31	33	1093,00	28,00	285,49
35	1093	19	420,31	35	1093,00	28,00	286,21
37	1093	19	420,31	37	1093,00	27,00	286,93
39	1093	19	420,31	39	1093,00	27,00	286,93
41	1093	19	420,31	41	1093,00	27,00	287,66
43	1093	19	420,31	43	1093,00	27,00	287,66
45	1093	19	420,31				

70 °C				90 °C			
t (s)	U (V)	I (nA)	ρ (G Ω m)	t (s)	U (V)	I (nA)	ρ (G Ω m)
1	1093	63	124,72	1	1093	78	100,93
3	1093	56	140,58	3	1094	73	108,14
5	1093	54	144,91	5	1094	72	110,3
7	1093	54	147,07	7	1094	71	111,02
9	1093	53	148,51	9	1094	71	111,75
11	1093	53	149,23	11	1094	71	111,75
13	1093	53	149,23	13	1094	71	111,75
15	1093	53	149,96	15	1094	71	111,75
17	1093	53	149,96	17	1094	71	111,75
19	1093	52	150,68	19	1094	71	111,75
21	1093	52	150,68	21	1094	70	111,47
23	1093	52	150,68	23	1094	71	111,75
25	1093	52	151,4	25	1094	70	112,47
27	1093	52	151,4	27	1094	71	111,75
29	1093	52	151,4	29	1094	70	112,47
31	1093	52	152,12	31	1094	70	112,47
33	1093	52	152,12	33	1094	70	113,19
35	1093	52	152,12	35	1094	70	112,47
37	1093	52	152,12	37	1094	70	113,19
39	1093	52	152,84	39	1094	70	113,19
41	1093	52	152,12	41	1094	70	113,19
43	1093	52	152,84	43	1094	70	113,19
45	1093	52	152,84				

Tabulka zpracovaných hodnot k vlivu frekvence.

f (Hz)	tg δ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka
40	0,001831	4E-07	2,555	0
45	0,001632	2E-07	2,555	0
50	0,001478	4E-07	2,555	0
55	0,001348	2E-07	2,555	0
60	0,001238	3,16E-07	2,555	0
65	0,001145	3,16E-07	2,555	0

Příloha D – zpracovaná data k esterovému oleji

Tabulka zpracovaných hodnot závislosti ztrátového činitele a relativní permitivity na teplotě.

ϑ (°C)	$\text{tg } \delta$ (-)	Odchylka	ϵ_r (-)	Odchylka
20	0,00049	1,4E-06	3,179	0
30	0,00096	4E-07	3,1576	0,00024
40	0,00194	2,1E-06	3,134	0
50	0,00378	1,1E-06	3,108	0
60	0,00741	5,8E-07	3,081	0
70	0,01355	1,7E-05	3,053	0
80	0,02325	1,3E-05	3,0266	0,00024
90	0,0399	9,4E-05	2,9982	0,0002
100	0,06339	6,6E-05	2,969	0
110	0,09847	1,9E-05	2,941	0
120	0,14232	8,6E-05	2,914	0

Tabulka zpracovaných hodnot k rezistivitě.

40 °C			
t (s)	U (V)	I (nA)	ρ (G Ω m)
1	1096	203	38,90
2	1096	174	45,40
4	1095	163	48,50
6	1095	156	50,60
8	1095	152	52,10
10	1095	149	52,90
12	1095	148	53,50
14	1094	147	53,80
16	1095	146	54,10
18	1095	145	54,40
20	1095	145	54,60
22	1095	144	54,70
24	1095	144	54,90
26	1094	143	55,00
28	1095	143	55,20
30	1095	143	55,40
32	1095	142	55,50
34	1094	142	55,60
36	1095	141	55,80
38	1095	141	55,90
40	1095	141	56,00
42	1095	141	56,00

Tabulka zpracovaných hodnot k vlivu frekvence.

f (Hz)	tg δ (-)	Odchylka	ε_r (-)	Odchylka
40	0,015664	2,06E-05	3,053	0
45	0,01409	1,58E-05	3,053	0
50	0,012852	5,83E-06	3,053	0
55	0,011742	5,83E-06	3,053	0
60	0,010824	5,1E-06	3,053	0
65	0,01003	3,16E-06	3,053	0