



# 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

## DIAGNOSTIKA A MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ PEVNÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ PRO TECHNIKU VYSOKÝCH NAPĚTÍ

DIAGNOSTIC AND ELECTRIC PARAMETER MEASUREMENT OF SOLID DIELECTRIC MATERIALS  
FOR HV.

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Róbert Czajtányi

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2019



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Róbert Czajtányi

**ID:** 173628

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Diagnostika a měření elektrických vlastností pevných izolačních materiálů pro techniku vysokých napětí

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše literatury, požadavky na zkoušky vyplývající z platných norem, články IEEE a již vypracované závěrečné práce
2. Princip měření na elektronickém můstku, automatické můstky, Tettex 2830/2831, buňka Tettex 2914
3. Příprava vzorků pro měření v laboratoři VVN
4. Laboratorní měření a zpracování naměřených výsledků

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

IEEE, Scopus, jiné vypracované závěrečné práce

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

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

**Konzultant:**

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

#### UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

CZAJTÁNYI, Róbert. Diagnostika a měření elektrických vlastností pevných izolačních materiálů pro techniku vysokých napětí. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/115112>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Michal Krbal.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Diagnostika a měření elektrických vlastností pevných izolačních materiálů pro techniku vysokých napětí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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: 26.05.2019

.....

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Krbalovi, Ph.D, za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

Brno: **26.05.2019**

.....  
podpis autora

## **ABSTRAKT**

Cieľom práce bolo oboznámenie sa s používanými pevnými izolačnými materiálmi v oblasti technike vysokého napätia a ich elektrickými vlastnosťami. Ďalším cieľom bolo popis existujúcich diagnostických metód podľa normy a oboznámenie sa z meracím pracoviskom. Nakoniec bolo prevedené meranie elektrických parametrov a vyhodnotenie výsledkov.

**KEÚČOVÉ SLOVÁ:** pevné izolačné materiály, meranie, diagnostika, elektrické vlastnosti, permitivita, stratový činiteľ, rezistivita, teplotné charakteristiky

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis was to get acquainted with the solid dielectric materials and their electrical properties, which are used in the area of high voltage technology. Further aim was to describe the existing diagnostic methods according to the standards and to introduce the measuring workstation. Finally, the measurement of the electrical parameters was performed, and the results were evaluated.

**KEY WORDS:** solid dielectric materials, measurement, diagnostics, electrical properties, permittivity, dissipation factor, resistivity, temperature characteristics.

## OBSAH

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV.....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2 VLASTNOSTI PEVNÝCH IZOLAČNÝCH MATERIÁLOV.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 REZISTIVITA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 PERMITIVITA.....</b>	<b>14</b>
2.2.1 KOMPLEXNÁ PERMITIVITA.....	15
<b>2.3 DIELEKTRICKÉ STRATY.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ.....</b>	<b>18</b>
<b>2.5 POLARIZÁCIA.....</b>	<b>20</b>
<b>3 MERANIE ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ PEVNÝCH IZOLAČNÝCH MATERIÁLOV.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 MERANIE PERMITIVITY A STRATOVÉHO ČINITELA.....</b>	<b>21</b>
3.1.1 SCHERINGOV MOSTÍK.....	21
3.1.2 TRANSFORMÁTOROVÝ MOSTÍK.....	22
3.1.3 AUTOMATICKÝ MOSTÍK.....	23
<b>3.2 MERANIE REZISTIVITY A ODPORU.....</b>	<b>24</b>
3.2.1 VOLTAMPÉROVÁ METÓDA.....	24
3.2.2 WHEATSTONOV MOSTÍK.....	25
3.2.3 KOMPENZAČNÁ METÓDA.....	25
<b>4 MERACIE PRACOVISKO.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 IMPEDANČNÝ ANALYZÁTOR TETTEX 2830/2831.....</b>	<b>27</b>
4.1.1 MERANIE KAPACITY (C) A STRATOVÉHO ČINITELA (TGA).....	27
4.1.2 MERANIE VNÚTORNEJ REZISTIVITY.....	28
<b>4.2 BUNKA TETTEX 2914.....</b>	<b>29</b>
<b>5 PEVNÉ IZOLAČNÉ MATERIÁLY.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 ORGANICKÉ IZOLAČNÉ MATERIÁLY.....</b>	<b>30</b>
5.1.1 PRÍRODNÉ IZOLANTY.....	30
5.1.2 SYNTETICKÉ IZOLANTY.....	31
<b>5.2 ANORGANICKÉ IZOLAČNÉ MATERIÁLY.....</b>	<b>32</b>
5.2.1 AMORFNÉ IZOLANTY.....	33
5.2.2 POLYKRYŠTALICKÉ IZOLANTY.....	33
<b>6 PRAKTICKÉ MERANIE.....</b>	<b>34</b>
<b>6.1 POPIS VZORIEK.....</b>	<b>34</b>
6.1.1 HE 6062.....	34
6.1.2 HE6063.....	34
6.1.3 ECCOH 5555.....	34

6.1.4 LE 4423.....	35
<b>6.2 POPIS MERANIA .....</b>	<b>35</b>
<b>6.3 VYHODNOTENIE MERANIA .....</b>	<b>36</b>
<b>7 ZÁVER.....</b>	<b>42</b>
<b>POUŽITÁ LITERATÚRA .....</b>	<b>43</b>



## ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 2-1 Trojelektródový merací systém [1] .....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2-2 Fázový diagram elektrickej indukcie a intenzity elektrického poľa pre izolanty v striedavej sústave [1] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-3 Paralelný a sériový náhradný obvod s fázorovými diagramami technického kondenzátora [4].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-4 Teplotná a frekvenčná charakteristika nepolárnych pevných izolantov [1] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-5 Napäťovo-časová charakteristika [5].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-1 Schéma zapojenia Scheringovho mostíka [4].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-2 Scheringov mostík s Wagnerovým uzemňovacím obvodom [4].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-3 Schéma zapojenia transformátorového mostíka [4].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-4 Automatický mostík pre meranie dielektrických strát [1] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-5 Schéma zapojenia pre voltampérovú metódu [1] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-6 Schéma zapojenia Wheatstonovho mostíka [1] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-7 Princíp kompenzačnej metódy [1] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-1 Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831 [8] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-2 Princíp dvojitého vektormetru [8] .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-3 Princíp merania rezistivity pomocou Tettex 2830/2831 [8].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-4 Tettex 2914 [9] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5-1 Klasifikácia pevných izolačných materiálov [6] .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 6-1 Priemerné hodnoty nameranej relatívnej permitivity jednotlivých materiálov.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 6-2 Priemerné hodnoty nameraného stratového činiteľa jednotlivých materiálov .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6-3 Závislosť relatívnej permitivity na teplote PE a PVC vzoriek pri napätí 1500 V a frekvencii 50 Hz.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6-4 Závislosť stratového činiteľa na teplote jednej PE a jednej PVC vzorky pri napätí 1500 V a frekvencii 50 Hz.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6-5 Závislosť stratového činiteľa na teplote PE vzoriek pri napätí 1500 V a frekvencii 50 Hz .....</i>	<i>41</i>

---

## ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 5-1 Vybrané vlastnosti niektorých termoplastov [6].....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 6-1 Merané PE a PVC materiály v laboratóriu VVN .....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6-2 Priemerné hodnoty, smerodajné odchýlky a variačné koeficienty pre jednotlivé pevné izolačné materiály .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6-3 Namerané hodnoty relatívnej permitivity a stratového činiteľa pri zvyšovanej teplote ..</i>	<i>39</i>

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

$A$	(m <sup>2</sup> )	efektívna plocha ochranej elektródy
AC	(-)	striedavé napätie
$c$	(m)	vzdialenosť medzi meracou a ochrannou elektródou
$D_I$	(m)	priemer meracej elektródy
DC	(-)	jednosmerné napätie
$E_p$	(V·m <sup>-1</sup> )	elektrická pevnosť
$f$	(Hz)	frekvencia
$h, d$	(m)	hrúbka vzorky
$p$	(m)	efektívny obvod ochranej elektródy
PE, PS, PVC	(-)	polyetylén, polystyrén, polyvinylchlorid
$R, R_x, R_i$	( $\Omega$ )	izolačný odpor
$R_p, R_s$	( $\Omega$ )	paralelný odpor, sériový odpor
$S$	(m <sup>2</sup> )	plocha elektród
$T_{MAX}$	(°C)	maximálna prevádzková teplota
$tg \delta$	(-)	stratový činiteľ
$U$	(V)	elektrické napätie
$U_p$	(V)	prierazné napätie
$V$	(%)	variačný koeficient
VVN	(-)	veľmi vysoké napätie
$\delta$	(°)	stratový uhol
$\epsilon_0$	(F·m <sup>-1</sup> )	permitivita vákua
$\epsilon_r, \epsilon'$	(-)	relatívna permitivita
$\epsilon^*$	(-)	komplexná permitivita
$\vartheta_{vz}$	(°C)	teplota vzorky
$\rho_p$	( $\Omega$ )	povrchová rezistivita
$\rho_v$	( $\Omega$ m)	vnútorná rezistivita
$\sigma$	(-)	smerodajná odchýlka

# 1 ÚVOD

V technike vysokých napätí sa izolačné materiály využívajú ako konštrukčné materiály a tiež slúžia ako izolácia pre oddelenie časti objektov s rozdielnym potenciálom. Najčastejšie sa stretávame s týmito materiálmi ako izolácie energetických káblov a tiež sa z nich vyrábajú napríklad aj izolátory. Najrozšírenejšími druhmi pevných elektroizolačných materiálov sú plasty a keramiky.

Skúšky elektroizolačných materiálov je možné rozdeliť na napäťové výdržné skúšky a na skúšky priemyselným napätím. Medzi skúšky priemyselným napätím patria merania elektrických parametrov, ako napríklad meranie stratového činiteľa, relatívnej permitivity, vnútornej rezistivity a meranie závislosti týchto parametrov na frekvencie, teplote, prílačnej sile či napätí.

Cieľom bakalárskej práce bolo zoznámiť sa s hlavnými druhmi elektroizolačných materiálov používaných v technike vysokého napätia, popis hlavných elektrických parametrov pre izolačné materiály, popis jednotlivých diagnostických metód na základe platných noriem, popis používaných meracích prístrojov na meracom pracovisku v laboratóriu VVN a nakoniec samotné praktické meranie a vyhodnotenie elektrických parametrov pre dané pevné izolačné materiály.

## 2 VLASTNOSTI PEVNÝCH IZOLAČNÝCH MATERIÁLOV

Reálne izolanty v tuhom stave najčastejšie charakterizujeme nasledujúcimi elektrickými vlastnosťami:

- Rezistivita  $\rho$  (vnútorná rezistivita  $\rho_V$  a povrchová rezistivita  $\rho_S$ )
- Relatívna permitivita  $\epsilon_r$
- Dielektrické straty  $\text{tg}\delta$
- Elektrická pevnosť  $E_p$

Okrem týchto vlastností je potrebné zmieniť sa aj o polarizácii izolačných materiálov, ktorá do značnej miery ovplyvňuje chovanie sa izolantu pri pôsobení elektrického poľa. Podrobnejším popisom jednotlivých elektrických vlastností pevných izolačných materiálov sa zaoberajú podkapitoly 2.1 až 2.5.

### 2.1 Rezistivita

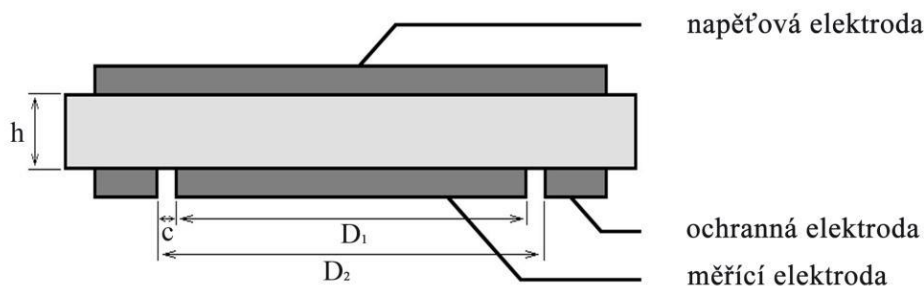
Ideálny izolant je taký materiál, ktorý neobsahuje žiadne voľné nosiče náboja a je teda dokonalý nevodič, pretože má nekonečnú rezistivitu resp. nulovú hodnotu vodivosti. V praxi takéto ideálne izolanty neexistujú, všetky technické izolanty obsahujú určité malé množstvo nosičov nábojov a dá sa meraním určiť rezistivitu, resp. vodivosť daného materiálu. Pre plochú vzorku pri predpoklade homogénneho poľa sa rezistivita obecné vyjadruje vzťahom:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h}, \quad (1)$$

kde  $S$  je plocha elektród,  $h$  je hrúbka vzorky a  $R$  je nameraný izolačný odpor.

Izolačný odpor je priamo určená hodnota okamžitého odporu, ktorá sa vypočíta z priloženého napätia a prúdu prechádzajúci vzorkou. Táto hodnota nie je prevedená na rozmery skúšaného materiálu a preto podľa izolačného odporu nie je možné vzájomne porovnávať jednotlivé materiály. Pre získanie hodnoty rezistivity je nutné prepočítať izolačný odpor s uvažovaním rozmerov vzorky. [1]

U pevných izolačných materiálov sa rozlišujú dva typy rezistivity. Je to vnútorná a povrchová rezistivita. Trojelektrodový systém na meranie vnútornej a povrchovej rezistivity je znázornená na Obr. 2-1 [1]



Obr. 2-1 Trojelektrodový merací systém [1]

Vnútorňá rezistivita je stanovená ako pomer intenzity jednosmerného elektrického poľa a hustoty ustáleného prúdu vo vnútri elektroizolačného materiálu. Jednotkou vnútornej rezistivity je  $\Omega\text{m}$ . V praxi sa tiež používa  $\Omega\text{cm}$ . V trojelektrodovom systéme sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\rho_V = R_X \frac{A}{h} = R_X \frac{\pi(D_1 + c)^2}{4h}, \quad (2)$$

kde  $R_X$  je nameraný odpor,  $A$  je efektívna plocha ochrannej elektródy,  $h$  je priemerná hrúbka skúšaného telesa,  $D_1$  je priemer meracej elektródy a  $c$  je vzdialenosť medzi meracou a ochrannou elektródou. [2]

Povrchová rezistivita je stanovená ako pomer intenzity jednosmerného poľa a lineárnej prúdovej hustoty v povrchovej vrstve elektroizolačného materiálu. Jednotkou povrchovej rezistivity je  $\Omega$ . V trojelektrodovom systéme sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\rho_p = R_X \frac{p}{c} = R_X \frac{\pi(D_1 + c)}{c}, \quad (3)$$

kde  $R_X$  je nameraný odpor,  $p$  je efektívny obvod chránenej elektródy,  $c$  je vzdialenosť medzi meracou a chránenou elektródou a  $D_1$  je priemer meracej elektródy. [3]

## 2.2 Permitivita

Permitivita izolačného materiálu vystihuje vplyv elektrického poľa na elektrický stav izolantu. Absolútna permitivita izolačného materiálu je – v meracom systéme – súčin jeho relatívnej permitivity  $\varepsilon_r$  a dielektrickej konštanty (permitivita vákuu)  $\varepsilon_0$  v tomto meracom systéme. [4] Dielektrická konštantá má hodnotu:

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \approx \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4)$$

Relatívna permitivita  $\varepsilon_r$  izolačného materiálu je pomer kapacity  $C_x$  kondenzátora, v ktorom je priestor medzi elektródami a okolo nich úplne vyplnený príslušným izolantom, ku kapacite  $C_0$  elektród rovnako usporiadaných umiestnených vo vákuu: [4]

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (5)$$

Relatívna permitivita suchého vzduchu, ktorý je prostý oxidu uhličitého, pri bežnom atmosférickom tlaku sa rovná 1,00053, takže v praxi je možné stanoviť relatívnu permitivitu tak, že namiesto  $C_0$  použijeme  $C_a$ , ktorú má rovnaké usporiadanie elektród vo vzduchu. [4]

Veľkosť relatívnej permitivity je závislá najmä na druhu polarizácie, teplote, frekvencie a prípadne na intenzite elektrického poľa. [1]

V technickej praxi okrem relatívnej a absolútnej permitivity sa vyskytuje ešte komplexná, optická a statická permitivita. [1]

### 2.2.1 Komplexná permitivita

Izolant v striedavom elektrickom poli sa správa diametrálne inak, ako pri vložení do jednosmerného elektrického poľa. Musíme počítať aj s kinetickými vlastnosťami častíc. Vektor elektrickej indukcie  $\vec{D}(t)$  je fázovo oneskorený o určitý uhol  $\delta$  za vektorom intenzity elektrického poľa  $\vec{E}(t)$  práve z dôvodu zotrvačnosti častíc. Pre vyjadrenie týchto veličín sa najprv urobí nasledujúce priradenia:

$$\vec{D}(t) \rightarrow \vec{D}_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (6)$$

$$\vec{E}(t) \rightarrow \vec{E}_m \cdot e^{j\omega t} \quad (7)$$

kde  $\vec{D}_m$  je amplitúda vektoru elektrickej indukcie a  $\vec{E}_m$  je amplitúda vektoru intenzity elektrického poľa. [1]

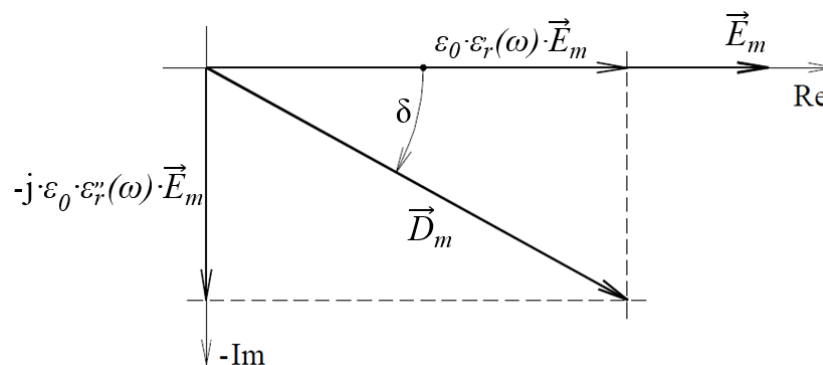
Vzťah medzi týmito veličinami po úpravách sa rovná:

$$\vec{D}_m \cdot e^{-j\omega} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) \cdot \vec{E}_m \quad (8)$$

Tu sa zavádza veličina frekvenčne závislej komplexnej permitivity  $\varepsilon^*(j\omega)$ , pre ktorú platí nasledujúci vzťah:

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

kde reálna zložka  $\varepsilon'(\omega)$  je vlastná relatívna permitivita izolačného materiálu a imaginárna zložka  $\varepsilon''(\omega)$  vyjadruje mieru strát v izolačnom materiálu počas pôsobenia striedavého elektrického poľa. [1]



Obr. 2-2 Fázový diagram elektrickej indukcie a intenzity elektrického poľa pre izolanty v striedavej sústave [1]

Na základe fázového diagramu na Obr. 2-2 je možné vyjadriť tangentu uhlu  $\delta$  ktorú nazývame ako stratový činiteľ:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (10)$$

Problematikou dielektrických strát a stratovým činiteľom sa podrobnejšie zaoberá nasledujúca podkapitola 2.3 [1]

### 2.3 Dielektrické straty

Dielektrické straty vznikajú tak pri pôsobení jednosmerného, ako aj striedavého napätia a to pri akomkoľvek tvare napät'ovej krivky. Straty pri pôsobení striedavého napätia sú však omnoho väčšie, ako pri priložení jednosmerného napätia.

Rozhodujúcou veličinou v prípade pôsobenia jednosmerného napätia je veľkosť prúdu prechádzajúci izolačným materiálom. Kvôli priechodu tohoto prúdu vznikajú Jouleove straty. Pre stratený výkon v tomto prípade platí vzťah:

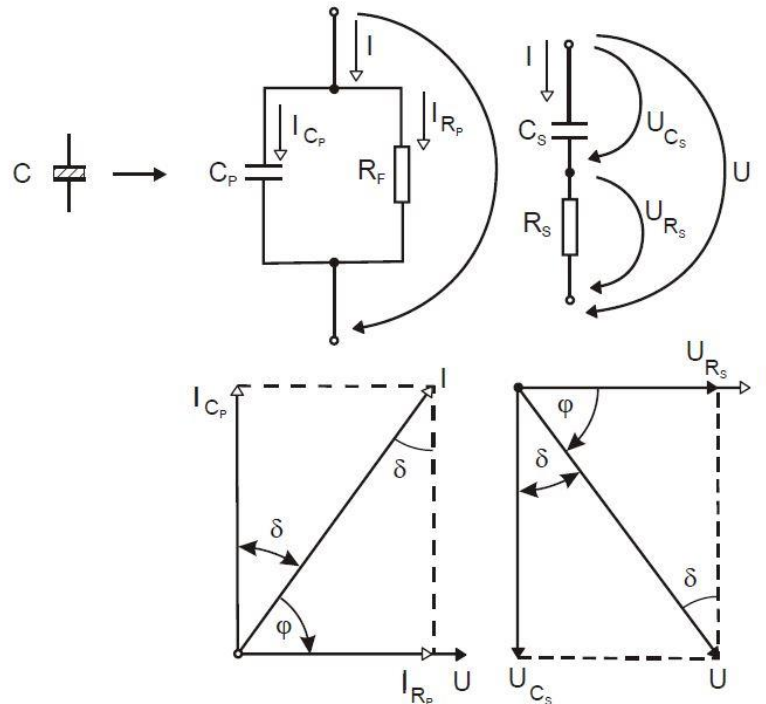
$$P_{Zss} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i} \quad (11)$$

Kde  $R_i$  je izolačný odpor materiálu,  $U$  je priložené jednosmerné napätie a  $I$  je ustálená hodnota prúdu prechádzajúceho vzorkou. [3]

Po vložení izolačného materiálu do striedavého elektrického poľa sa určitá časť energie v tomto materiálu premení na neúčinné teplo. Túto energiu nazývame ako dielektrické straty. Oteplenie izolačných materiálov zhoršuje ich funkčné vlastnosti, preto dielektrické straty sú nežiadúcim javom. Fázový posun, ktorý vzniká medzi intenzitou elektrického poľa a elektrickou indukciou sa nazýva ako stratový uhol  $\delta$ . Tangenta tohoto uhlu je bezrozmerná veličina  $\operatorname{tg} \delta$ , ktorá veličina sa nazýva ako stratový činiteľ. V praxi straty dielektrika sa najčastejšie vyjadrujú práve pomocou stratového činiteľa. Môže sa vyjadriť číselne s desatinným číslom alebo aj v percentách. Dielektrické straty môžeme ešte vyjadriť aj pomocou stratového výkonu  $P_Z$ . Pri pôsobení striedavého elektrického poľa pri vyjadrení dielektrických strát sa predpokladá, že na izolačný materiál pôsobí sinusové napätie a neuvažuje sa so žiadnym rušením. Relatívnu permitivitu je možné predpokladať za konštantnú. [1] [4]

Matematický výpočet stratového činiteľa vychádza z náhradných obvodov technického kondenzátora, ktoré sú uvedené na Obr. 2-2. [1]





Obr. 2-3 Paralelný a sériový náhradný obvod s fázorovými diagramami technického kondenzátora [4]

Keď sa vychádza z paralelného náhradného obvodu technického kondenzátora, tak pre stratový činiteľ platí vzťah:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega C_P R_P} = \frac{G_P}{\omega R_P} \quad (12)$$

Pri výpočtu zo sériového náhradného obvodu sa využíva vzťah:

$$tg\delta = \omega C_S R_S \quad (13)$$

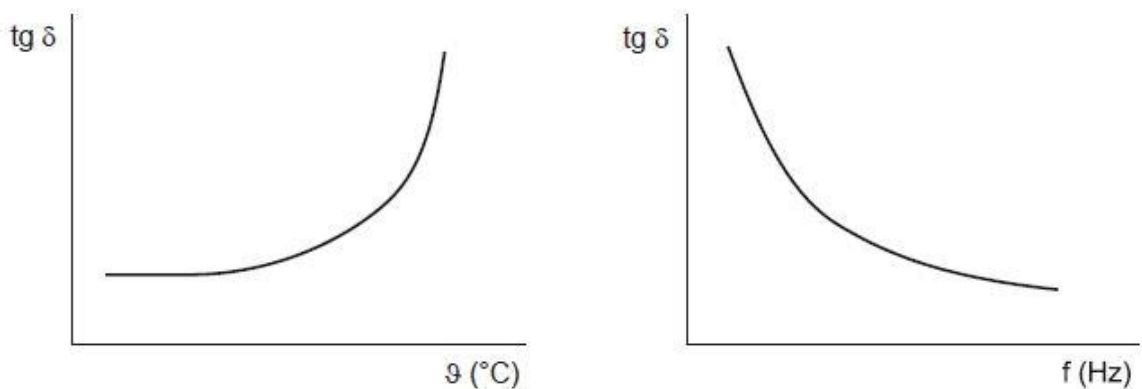
Pri malých hodnotách stratového činiteľa sa obidva náhradné schémy budú líšiť len veľmi mierne. Rozdiely sú výraznejšie len pri materiáloch s veľkými dielektrickými stratami. Pre rýchle posúdenie kvality daného izolačného materiálu obecné platí, že z elektroizolačného hľadiska sa považuje materiál za dobrý, ak jeho stratový činiteľ je menší než  $10^{-3}$ . Naopak materiál so stratovým činiteľom väčším ako  $10^{-2}$  sa považuje za špatný. Pre objektívnejšie posúdenie izolačného materiálu je nutné skúmať jeho stratový činiteľ v závislosti na veľkosti priloženého napätia, frekvencie a teplote. Tým sa rozumejú nasledujúce charakteristiky:

- Stratová charakteristika –  $tg\delta = f(U)$  – závislosť stratového činiteľa na priloženom striedavom sinusovom napätí pri konštantnej teplote a frekvencie. Charakteristika je vodorovná alebo môže byť mierne stúpajúca.
- Frekvenčná charakteristika –  $tg\delta = f(f)$  – závislosť stratového činiteľa na veľkosti frekvencie pri konštantnej teplote a veľkosti priloženého napätia. Táto charakteristika má

lokálne extrémny, kde stratový činiteľ má najvyššiu hodnotu. Pri aplikácii materiálu sa vyhýbame oblastiam týchto frekvencií.

- Teplotná charakteristika –  $\text{tg } \delta = f(\theta)$  – závislosť stratového činiteľa na teplote pri konštantnom priloženom napätí a frekvencie. Aj pri tejto charakteristike je možné nájsť lokálne extrémny. Tieto extrémny nazývame ako prechody a označujeme ich s malými písmenami gréckej abecedy od vyšších teplôt k nižším.

V pevných izolantoch sa vo všeobecnosti môžu vyskytovať vodivostné, polarizačné a ionizačné dielektrické straty. Vodivostné straty sa vyskytujú vo všetkých tuhých izolantoch, polarizačné straty sú typické pre izolanty, v ktorých sa vyskytujú stratové polarizácie. Ionizačné dielektrické straty sa uplatňujú v tých pevných izolantoch, ktoré majú plynové dutinky a uplatňujú sa iba pri takých napätiach, kde nastáva ionizácia týchto plynov. [1]



Obr. 2-4 Teplotná a frekvenčná charakteristika nepolárnych pevných izolantov [1]

V nepolárnych pevných izolantoch sa vyskytujú výlučne iba vodivostné dielektrické straty. Závislosť stratového činiteľa od teploty a frekvencie je znázornená na Obr. 2-4. [1]

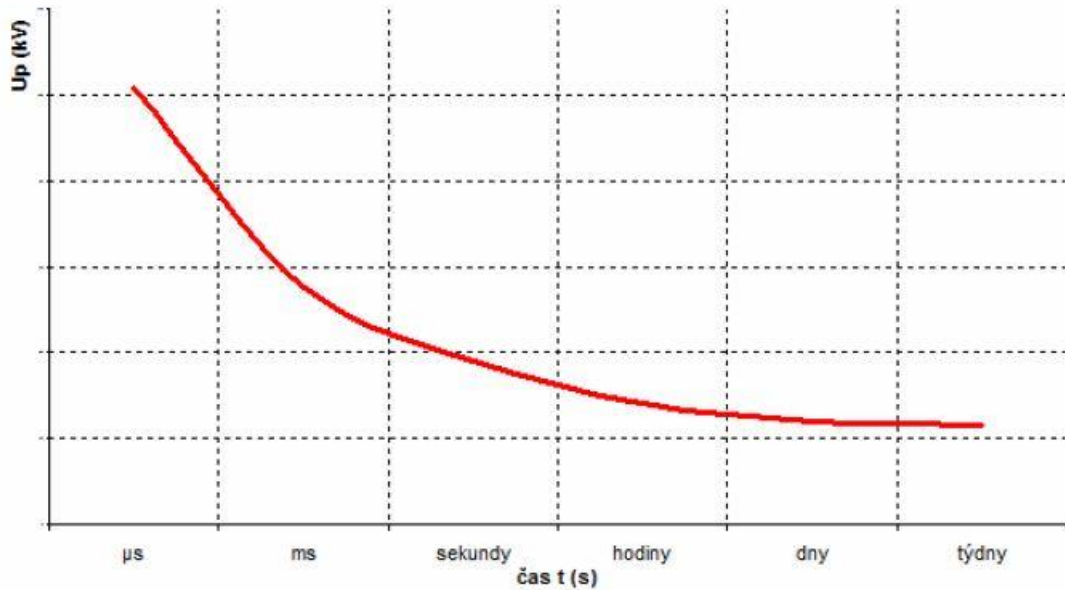
## 2.4 Elektrická pevnosť

Elektrickou pevnosťou  $E_p$  sa vyjadruje schopnosť izolantu zachovať si svoje elektroizolačné vlastnosti v elektrickom poli. Je jeden zo základných parametrov elektroizolačných materiálov. Vyjadruje sa ako podiel prierazného napätia  $U_p$  a hrúbky  $d$  skúšaného izolantu v mieste prierazu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (14)$$

Kde  $E_p$  ( $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) je elektrická pevnosť izolantu,  $U_p$  (kV) je prierazné napätie a  $d$  (mm) je hrúbka skúšaného materiálu. Elektrická pevnosť závisí ešte od teploty, homogenity elektrického poľa, času pôsobenia a od tvaru napät'ovej krivky. [5]

Na rozdiel od plyných a kvapalných izolantov u pevných izolantoch pri prierazu napätia sa vytvorí vodivá cesta a v štruktúre materiálu nastanú nenapraviteľné škody. [1]



Obr. 2-5 Napätovo-časová charakteristika [5]

Podľa časového priebehu namáhania je možné elektrickú pevnosť rozdeliť na rázovú, krátkodobú a trvalú. Rázová pevnosť je daná impulzným namáhaním izolantu, krátkodobá sa spôsobuje postupným zvyšovaním napätia na izolante a nakoniec trvalá pevnosť je daná dlhodobým pôsobením napätia. [5]

Na Obr. 2-5 je znázornený príklad napätovo-časovej charakteristiky izolantu. Je na ňom vidieť grafickú závislosť veľkosti prierazného napätia na dobe trvania namáhania až do jej prierazu. Pre najkratšie časy sa jedná čisto o elektrický prieraz. Pri dlhšej dobe namáhania je už rozhodujúcejším faktorom starnutie materiálu a tepelné javy. [3] [5]

Z hľadiska charakteru a priebehu dejov, ktoré pri prierazu prebiehajú v pevných izolačných materiáloch, rozlišujeme tri spôsoby prierazov:

**Čisto elektrický prieraz** – pri tomto typu prierazu veľkosť prierazného napätia je nezávislá na teplote a dĺžke pôsobenia elektrického poľa. Energia elektrického poľa je tak veľká, že v najslabšom mieste namáhaného izolantu sa okamžite vytvorí vodivá cesta a dôjde k deštrukcii materiálu. Tento typ prierazu je závislý na homogenite elektrického poľa a tiež je ovplyvňovaná zložením a štruktúrou skúšaného izolantu. [1]

**Tepelný prieraz** – pri tomto typu prierazu je veľkosť prierazného napätia do veľkej miery závislá na teplote a dĺžke pôsobenia elektrického poľa. V tomto prípade homogenita elektrického poľa a izolantu nemajú taký veľký vplyv, ako pri čisto elektrickom prieraze. Tepelný prieraz je dôsledkom Joulových strát a tiež dielektrických strát. V miestach, kde je na izolantu vyššia teplota, dôjde k navýšeniu elektrickej vodivosti a dielektrických strát. Tento dej potom spôsobuje ešte väčší ohrev v týchto miestach. [1]

**Elektrochemický prieraz (starnutie izolantov)** – Tento typ prierazu sa uplatňuje v takých prípadoch, keď na daný izolant pôsobí elektrické pole dlhú dobu. V takom prípade sa v izolantu naštartujú elektrochemické procesy, ktoré postupne zhoršujú jeho vlastnosti a nakoniec sa výrazne zníži jeho elektrická pevnosť a nastane prieraz v materiálu. Pri výbere izolantu pre danú aplikačnú oblasť je rozhodujúce najmä jeho odolnosť voči elektrickému namáhaniu. Jedným z rozhodujúcich faktorov je odolnosť materiálu voči pôsobeniu prevádzkových činiteľov. Pôsobením týchto

činiteľov dochádza v materiáloch buď k reverzibilným (vratným), alebo ireverzibilným (nevratným) zmenám. Vratné zmeny sú vyvolané len krátkodobým pôsobením prevádzkových činiteľov. Ich vplyv je možné obmedziť vhodnými opatreniami. Naopak nevratné zmeny sú vyvolané trvalým pôsobením prevádzkových činiteľov. Tieto zmeny majú trvalý charakter a nie je ich možné vrátiť späť. Zlyhávanie izolantov nastáva aj v takých prípadoch, kde proti vzniku tepelného prierazu sú zavedené vhodné opatrenia. A dokonca aj v takých prípadoch, kde prevádzkové napätie je menšie ako napätie, pri ktorom bol daný izolant skúšaný. Bez viditeľných príčin dochádza k prierazom po rôznych dobách, môžu to byť týždne, mesiace aj roky. Najnovšie výskumy ukazujú, že v týchto prípadoch majú rozhodujúci vplyv čiastkové výboje v plynových dutinkách pevného materiálu. [1]

## 2.5 Polarizácia

Po oboznámení sa s hlavnými elektrickými parametrami izolačných materiálov sa musí ešte vysvetliť pojem polarizácie izolačných materiálov, ktorý pojem už bol viackrát zmienený v tom zmysle, že ako sú na ňom závislé jednotlivé elektrické parametre.

Po vložení izolačného materiálu do vonkajšieho elektrického poľa dôjde k narušeniu štruktúry v celom materiálu. Elektricky nabité častice sa posunú v smeru (kladné náboje), alebo proti smeru (záporné náboje) pôsobiaceho poľa. Tento posuv nábojov sa nazýva polarizácia. Počas polarizácie v izolantu vznikajú tzv. elektrické dipóly, ktoré majú svoj dipólový moment. Mierou polarizácie je tzv. vektor polarizácie  $P$  a relatívna permitivita  $\epsilon_r$ . Izolačné materiály sa rozdeľujú podľa vzniku polarizácie na polárne a nepolárne. [6]

Jednotlivé polarizačné mechanizmy je možné rozdeliť podľa doby ustálenia polarizácie. Sú to polarizácie s rýchlym priebehom (pružné) a pomalým priebehom (relaxačné).

**Pružná elektrónová a iónová polarizácia** má veľmi rýchly priebeh ( $10^{-12} - 10^{-15}$  s). Jedná sa o polarizácie bez strát. Elektrónová polarizácia sa vyskytuje u všetkých izolačných materiáloch a nie je závislá na teplote. Naopak iónová polarizácia je charakteristická len pre iónové kryštály a je závislá na teplote. [1]

**Relaxačná dipólová a iónová polarizácia** už má pomalý priebeh. Tieto polarizácie sú stratové a sú závislé na teplote a frekvencii. Dipólová sa vyskytuje u polárnych látok so slabou väzbou dipólových molekúl, a iónová sa vyskytuje v iónových látkach (anorganické sklá, keramiky so sklenenou fázou). U pevných izolantoch sa na relaxačnej polarizácie podieľajú ióny a elektróny v nečistotách, alebo v miestach narušenia. [1]

**Medzi vrstvomá (migračná) polarizácia** je najpomalším polarizačným mechanizmom. Vyskytuje sa u nehomogénnych izolantoch, ktoré sa skladajú z viacerých materiálov a ktoré majú odlišné elektrické vlastnosti, ako napríklad permitivitu a rezistivitu. Migračná polarizácia je stratová a je závislá na teplote. [1]

Okrem uvedených typov sa v elektrotechnike vyskytujú ešte ďalšie typy polarizácie, ako je napríklad pyroelektrická alebo piezoelektrická polarizácia. [7]

### 3 MERANIE ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ PEVNÝCH IZOLAČNÝCH MATERIÁLOV

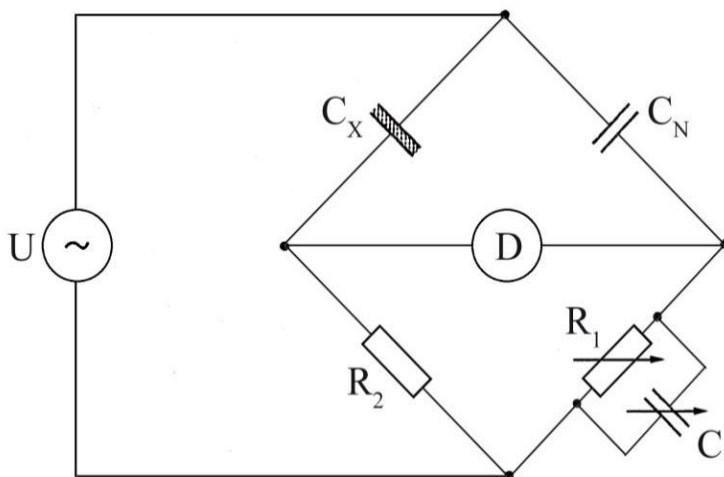
Na meranie elektrických parametrov existuje veľmi veľa metód. Tie najpoužívanejšie zapojenia na meranie rezistivity, permitivity a stratového činiteľa sú podrobnejšie rozoberané v tejto kapitole.

#### 3.1 Meranie permitivity a stratového činiteľa

Pri meraní stratového činiteľa a permitivity sú využívané také meracie metódy, ktorých princípom je určenie prvkov náhradnej schémy dielektrika. Treba ale pripomenúť, že je oveľa správnejším riešením merať závislosti stratového činiteľa a permitivity na teplote, frekvencii a napätia, aby bol dosiahnutý objektívny pohľad v tejto oblasti. Ďalším dôležitým faktorom je frekvenčná závislosť týchto parametrov. A to z toho dôvodu, aby sme sa presvedčili o chovaní sa aplikovaného materiálu pri určitej frekvencii. Doporučenými postupmi a metódami merania permitivity a stratového činiteľa sa podrobne zaoberá norma ČSN IEC 250 „Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek“. [1]

##### 3.1.1 Scheringov mostík

Najpoužívanejšou metódou pre stanovenie stratového činiteľa je metóda využívajúca zapojenie Scheringovho mostíka, ale dajú sa použiť tiež iné mostíky ako napríklad paralelný T-mostík alebo transformátorový mostík. Scheringov mostík sa dá rozdeliť na dve hlavné časti. Prvá časť tvoria prvky umiestnené v hornej časti mostíka. Táto časť sa nazýva tiež, ako kapacitná vetva. V druhej dolnej časti mostíka sa nachádzajú prvky slúžiace na vyvažovanie mostíka. Táto časť sa tiež nazýva ako meracia vetva. Galvanické oddelenie týchto dvoch častí zabezpečuje vzorka priložená do elektródového systému a tiež kapacitný normál  $C_N$ . V hornej kapacitnej vetve sa nachádzajú dve kapacity. Prvá kapacita, označená ako  $C_X$  je skúšaná vzorka a druhá, označená ako  $C_N$  je kapacita bez dielektrických strát. V meracej vetve sú umiestnené dve rezistory bez reaktancie  $R_1$  a  $R_2$ . Rezistor  $R_2$  je zapojený proti neznámej meranej kapacite  $C_X$  a je tiež premostený kapacitou  $C_1$  ktorá je regulovateľná. Obecne je ešte jeden z rezistorov tiež regulovateľný, na Obr. 3-1 je to práve rezistor  $R_1$ . [1] [4]



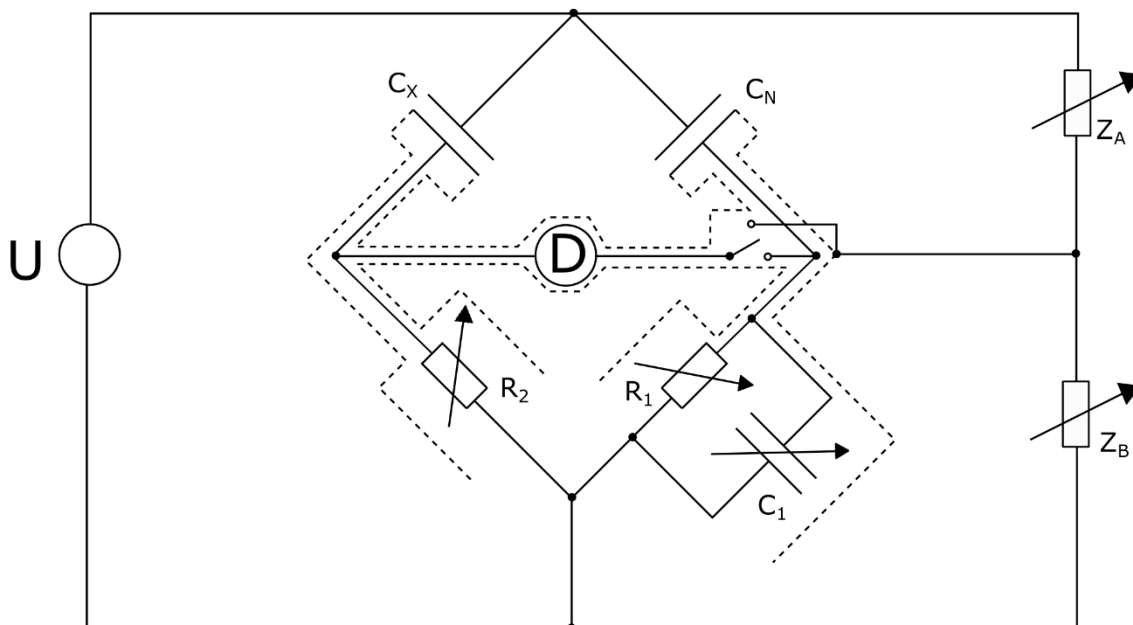
Obr. 3-1 Schéma zapojenia Scheringovho mostíka [4]

Ak sa vyberie za kapacitu  $C_X$  ekvivalentná náhrada zložený z odporu  $R_S$  a čistej kapacity  $C_S$  v sérii, vyvážený mostík spĺňa podmienky:

$$C_S = C_N \frac{R_1}{R_2} \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_S R_S = \omega C_1 R_1 \quad (16)$$

Pre techniku vysokých napätí sú problémy dielektrických strát zaujímavé pri nízkych frekvenciách. V tomto prípade sa používa napätie vyššie ako 1 kV. Veľký rozdiel impedancie medzi kapacitnou a meracou vetvou spôsobuje tiež nerovnosť rozloženia napätia z toho dôvodu, že najväčší diel napätia sa nachádza medzi kapacitami  $C_X$  a  $C_N$ . Aby platili podmienky rovnováhy, je nutné nízkonapäťové prvky mostíka tieniť pred vysokonapäťovými prvkami. Pre zaistenie stability rovnováhy sa toto tienenie uzemňuje. Na tieto účely sa používa zapojenie Scheringovho mostíka s Wagnerovým uzemňovacím obvodom, ktorý je uvedený na Obr. 3-2. [1] [4]



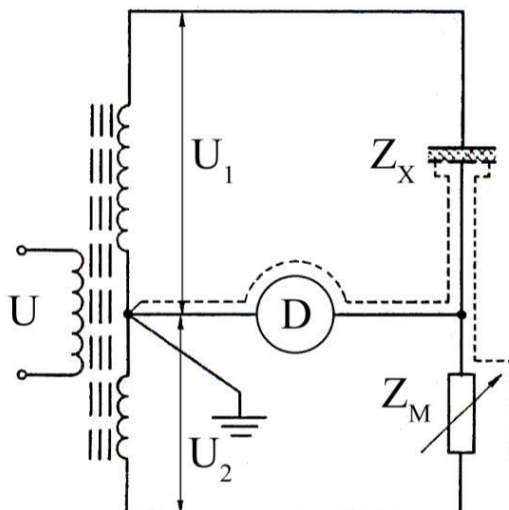
Obr. 3-2 Scheringov mostík s Wagnerovým uzemňovacím obvodom [4]

### 3.1.2 Transformátorový mostík

Schéma zapojenia transformátorového mostíka je znázornená na Obr. 3-3. Princíp tohoto mostíka je jednoduchší, ako princíp Scheringovho mostíka. V rovnovážnom stave je pomer impedancií  $Z_X$  a  $Z_M$  rovný pomeru napätí  $U_1$  a  $U_2$ . Keď tento pomer je známy, tak pri známej hodnote impedancie  $Z_M$  sa  $Z_X$  vypočíta jednoduchým spôsobom. V prípade ideálneho mostíka je pomer  $U_1/U_2$  celé číslo  $k$  a pre neznámu impedanciu platí vzťah:

$$Z_X = k \cdot Z_M \quad (17)$$

Pri argumentu  $Z_M$  sa priamo vypočíta  $\delta_x$ . [4]

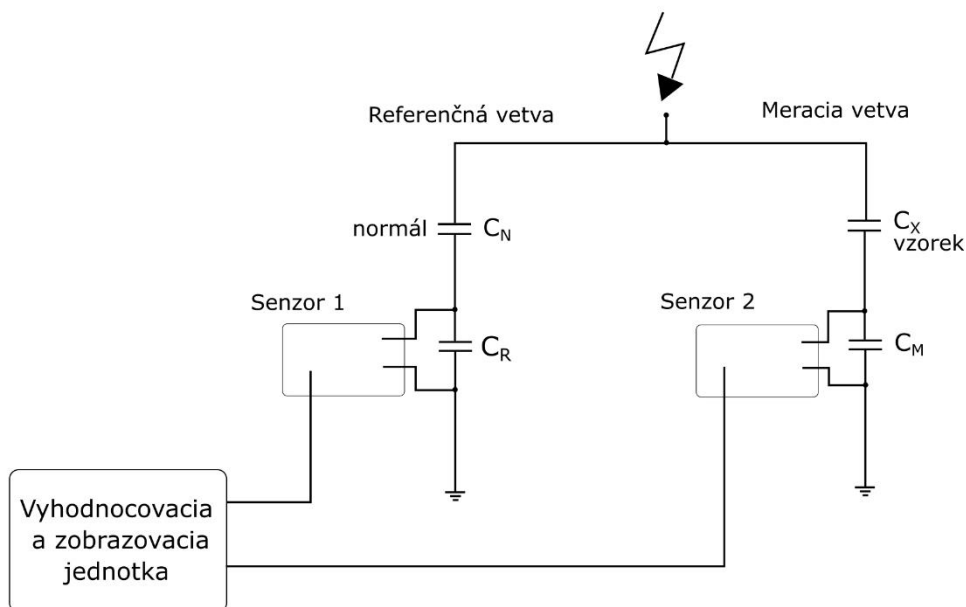


Obr. 3-3 Schéma zapojenia transformátorového mostíka [4]

Transformátorový mostík má výhodu oproti Scheringovho mostíka v tom, že pre uzemnenie tienenia a chránenej elektródy nepotrebuje ďalšie obvody vetvy. [4]

### 3.1.3 Automatický mostík

Princíp automatického mostíka pre meranie dielektrických strát vychádza z klasického zapojenia Scheringovho mostíka. Schéma zapojenia je uvedená na Obr. 3-4. Mostík umožňuje automatické zobrazenie stratového činiteľa  $tg\delta$  a kapacity izolačného materiálu  $C_X$ . [1]



Obr. 3-4 Automatický mostík pre meranie dielektrických strát [1]

Jednotlivé vetvy mostíka fungujú ako kapacitné deliče. Kapacity  $C_N$  a  $C_X$  sú vysokonapäťové a kapacity  $C_R$  a  $C_M$  nízkonapäťové. Meria sa fázový uhol medzi napätiami na oboch nízkonapäťových kondenzátoroch a potom pomocou senzoru 1 a senzoru 2 sú tieto hodnoty digitalizované a prenášané do počítaču. Tam pomocou Fourierovej transformácie je určený

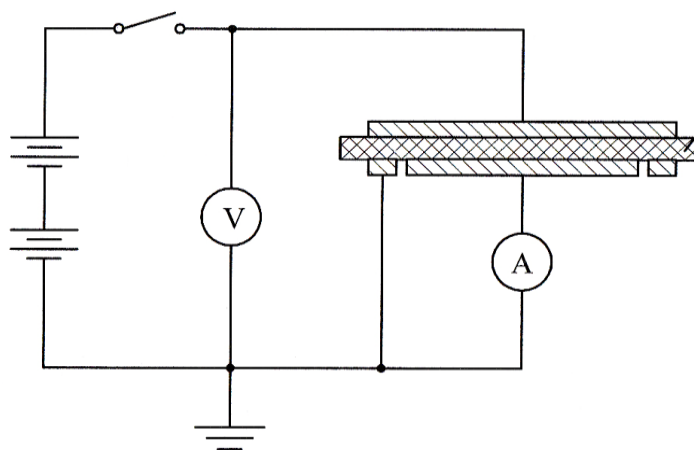
stratový činiteľ  $tg\delta$ . Kapacita izolačného materiálu sa určuje z deliaceho pomeru meracej vetvy. [1]

### 3.2 Meranie rezistivity a odporu

Na meranie odporu a rezistivity izolačného materiálu sú využívané viaceré metódy. Spôsoby merania vnútornej a povrchovej rezistivity izolačného materiálu sú popísané v norme ČSN IEC 93 „Metody měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů“. So spôsobmi merania izolačného odporu sa zaoberá norma ČSN IEC 167 „Zkušební metody na stanovení izolačního odporu tuhých elektroizolačních materiálů“. Metódy merania odporu môžeme rozdeliť do dvoch skupín. Na jednej strane sú to priame a na druhej strane nepriame metódy merania odporu. Priame metódy sú založené na súčasnom meraní napätia a prúdu, naopak metódy nepriame určujú pomer známeho a neznámeho odporu, alebo porovnávajú prúdy tečúce cez odpory pri priloženom konštantnom napätí. [1]

#### 3.2.1 Voltampérová metóda

V praxi na stanovenie vnútornej a povrchovej rezistivity izolačného materiálu sa najčastejšie používa voltampérová metóda. Jedná sa o najjednoduchšiu metódu – jeho schéma zapojenia je uvedená na Obr. 3-5.



Obr. 3-5 Schéma zapojenia pre voltampérovú metódu [1]

Používa sa len jednosmerný voltmeter na meranie napätia, ktorý je priložený na izolačný materiál a ampérmeter, ktorým sa nameria prúd prechádzajúci materiálom. Z nameraných hodnôt je nutné ešte vypočítať neznámu veľkosť odporu podľa Ohmovho zákona.

$$R_x = \frac{U}{I_x} \quad (18)$$

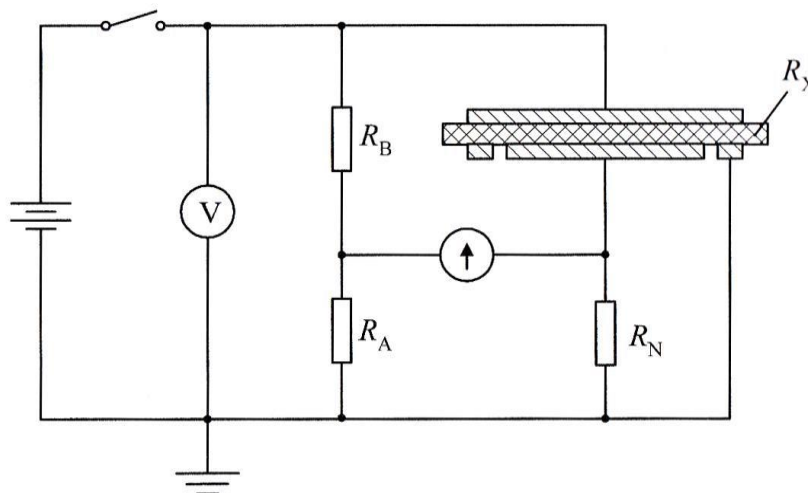
kde  $U$  je pripojené napätie a  $I_x$  je prúd pretekajúci vzorkou.

Pri meraní kvalitných materiálov je nutné aby bol použitý prístroj na meranie prúdu s citlivosťou aspoň  $10^{-16}$ . [1] [2]



### 3.2.2 Wheatstonov mostík

Ďalším často používaným zapojením je metóda Wheatstonovho mostíka, jeho schéma je znázornené na Obr. 3-6. Jeho princípom je porovnávanie veľkosti neznámeho odporu – v našom prípade sa jedná o odpor izolačného materiálu – s referenčným odporom, ktorého hodnota je známa. [1]



Obr. 3-6 Schéma zapojenia Wheatstonovho mostíka [1]

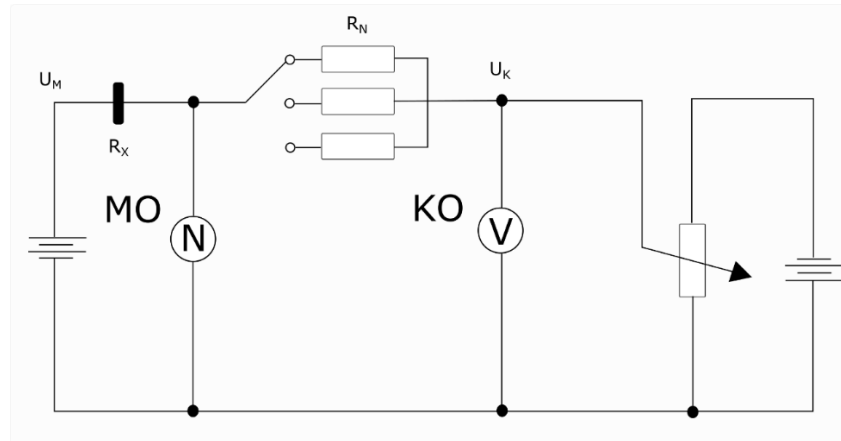
Ako je vidieť na Obr. 3-4, meraná vzorka je zapojená do jednej vetvy Wheatstonovho mostíka. Všetky ostatné odpory majú známu hodnotu. Odpor  $R_B$  sa postupne mení dekadicky a odpor  $R_A$  slúži k jemnému vyrovnávaniu. Hodnota odporu  $R_N$  je pri meraní konštantná. Pre stanovenie rovnováhy je do obvodu ešte zapojený nulový indikátor. [1]

Pre výpočet hodnoty neznámeho odporu pri rovnováhe sa používa vzťah:

$$R_X = R_N \cdot \frac{R_B}{R_A} \quad (19)$$

### 3.2.3 Kompenzačná metóda

Princíp kompenzačnej metódy je znázornené na Obr. 3-7. Schéma zapojenia sa rozdeľuje na dve časti, a to na merný obvod MO a kompenzačný obvod KO. V mernom obvode sa nachádza jednosmerný zdroj merného napätia  $U_M$  a vzorka s neznámym odporom  $R_X$ . V kompenzačnom obvode je umiestnený normálový odpor  $R_N$  a ďalej zdroj kompenzačného napätia  $U_K$ . [1]



Obr. 3-7 Princíp kompenzačnej metódy [1]

Metóda funguje na základe kompenzácie úbytku napätia na normálovom odpore  $R_N$  pomocou regulovania kompenzačného napätia  $U_K$ . V okamihu vykompenzovaného stavu indikátorom N nebude pretekať žiadny prúd a bude splnená rovnosť:

$$\frac{U_M}{R_X} = \frac{U_K}{R_N} \Rightarrow R_X = R_N \frac{U_M}{U_K} \quad (20)$$

## 4 MERACIE PRACOVISKO

Meracie pracovisko na testovanie elektroizolačných materiálov sa nachádza v laboratóriu VVN vo vedecko technickom parku Profesora Lista. Pracovisko sa skladá z impedančného analyzátoru Tettex 2830/2831 a z meracej bunky Tettex 2914 pre pevné dielektriká.

### 4.1 Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831

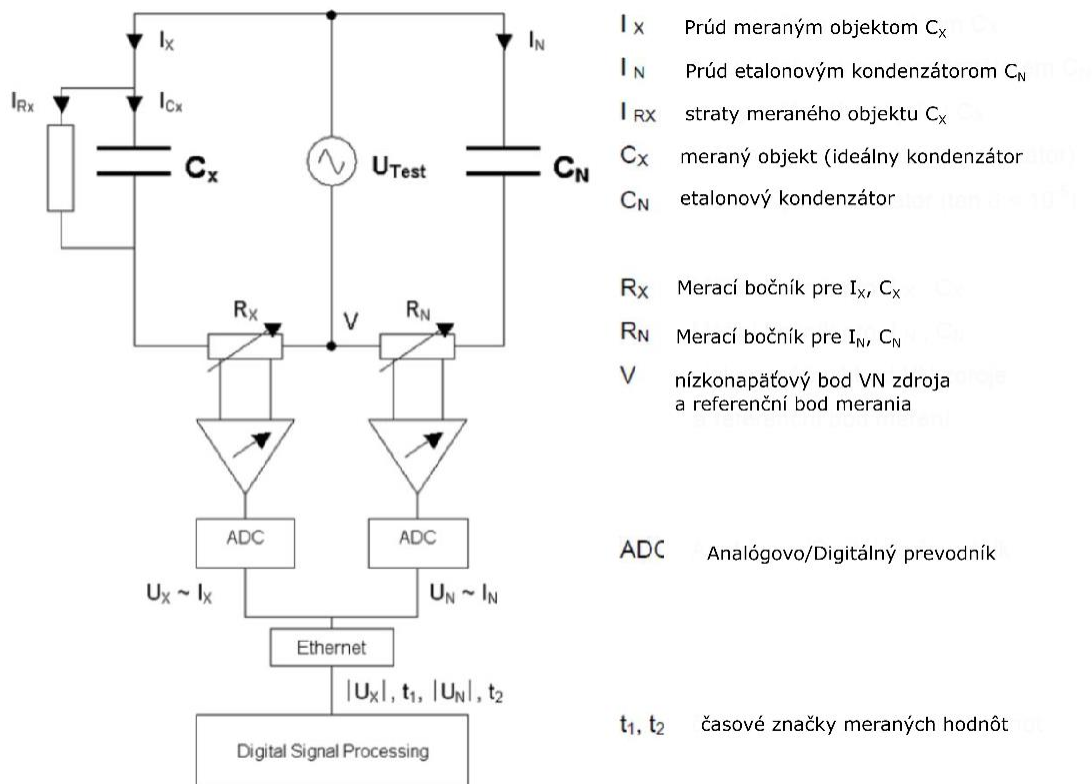
Analyzátor Tettex 2830/2831 (*Obr. 4-1*) je prístroj na meranie elektrických vlastností pevných a tekutých dielektrických materiálov. Jeho hlavné časti sú jednosmerný (DC) a striedavý (AC) zdroj napätia, teplotný regulátor, vektorový mostík a merač jednosmerného DC odporu. Prístroj je schopný analyzovať až 13 rôznych parametrov, ako napríklad relatívnu permitivitu, stratový činiteľ, geometrickú kapacitu, vnútornú rezistivitu atď. Maximálne pracovné napätie je 2,5 kV, teplotu je možné regulovať až do 200 °C a frekvenčný rozsah prístroja je 40-65 Hz. [8]



*Obr. 4-1 Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831 [8]*

#### 4.1.1 Meranie kapacity (C) a stratového činiteľa (tgδ)

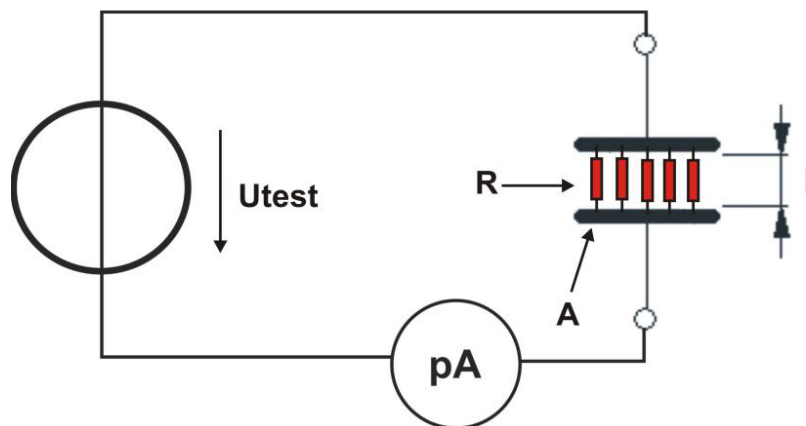
Meranie kapacity a stratového činiteľa pomocou systému Tettex 2830 je založená na metóde tzv. dvojitého vektrometru, ktorý je znázornený na *Obr. 4-2*. Meria sa prúd  $I_N$ , ktorý preteká referenčným kondenzátorom  $C_N$  a prúd  $I_X$ , ktorý preteká meraným objektom (cez vzorku)  $C_X$ . Obidve vetvy sú napájané zdrojom striedavého napätia ( $U_{Test}$ ). Prúdy, ktoré sú merané pomocou bočníkov  $R_X$  a  $R_N$ , sú následne digitalizované. Dátová zbernica IEEE 1394 „fire wire“ slúži na to, aby všetky digitalizované dáta boli časovo označené. Vďaka tejto technológii sa dá veľmi presne merať daná veličina, ale aj fázový posun medzi  $I_N$  a  $I_X$ . Všetky digitalizované dáta sú potom spracovávané pomocou vstavaného počítača. [8]



Obr. 4-2 Princíp dvojitého vektormetru [8]

#### 4.1.2 Meranie vnútornej rezistivity

Meranie DC odporu je založené na zabudovanom pikoampermetre v module 2831, ktorý meria prúd tečúci cez skúšobnú bunku. Zabudovaný vysokonapäťový zdroj v module 2831 napája skúšobnú bunku tak, aby prúd mohol pretekať cez pevnú vzorku a cez pikoampermeter. Použité hodnoty napätia a prúdu sa digitalizujú pre ďalej sa spracovávajú pomocou zabudovaného počítača v module 2830. Pre výpočet vnútornej rezistivity je nutné poznať štyri parametre: hodnotu priloženého napätia, veľkosť prúdu tečúci cez skúšanú vzorku, plochu povrchu meracej elektródy a hrúbku skúšaného materiálu. [8]



Obr. 4-3 Princíp merania rezistivity pomocou Tettex 2830/2831 [8]

## 4.2 Bunka Tettex 2914

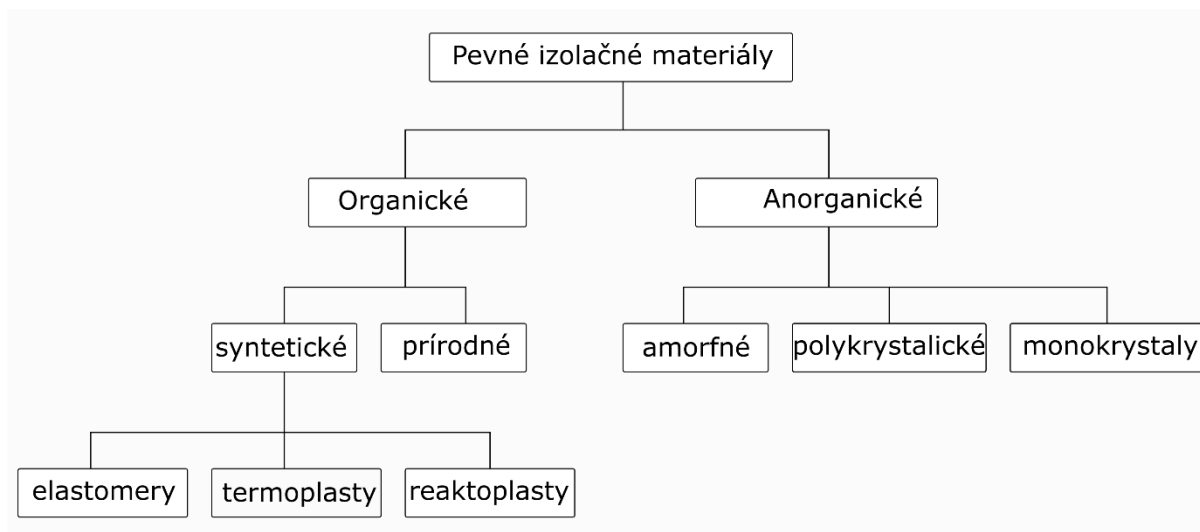
Bunka Tettex 2914 (viz. Obr. 4-2) je trojelektrodový systém pre meranie elektrických parametrov pevných izolačných materiálov. Skladá sa z vyhrievaného doskového kondenzátoru. Dolná doska je vysokonapäťová elektróda, ktorá je na pevnom podklade, horná doska sa skladá z ochrannej a meracej elektródy. Táto doska je výškovo nastaviteľná pomocou hydraulického systému, ktorým sa dá meniť prítlačnú silu na izolačný materiál. Táto bunka tiež umožňuje meniť atmosférický tlak, ktorý je užitočný pri skúmaní izolačných materiálov pri rôznych podmienkach. Maximálna hodnota pracovného napätia je 2000 V. Ako už bolo zmienené, dolnú elektródu je možné vyhrievať a to až do 200 °C. [9]



Obr. 4-4 Tettex 2914 [9]

## 5 PEVNÉ IZOLAČNÉ MATERIÁLY

Tuhé elektroizolačné materiály zahŕňajú veľké množstvo látok, najviac zo všetkých typov izolačných materiálov. Práve preto je možné ich rozdeliť do niekoľko skupín podľa Obr. 5-1



Obr. 5-1 Klasifikácia pevných izolačných materiálov [6]

Nasledujúce podkapitoly sa venujú jednotlivým skupinám podrobnejšie.

### 5.1 Organické izolačné materiály

Organické izolanty v súčasnosti tvoria rozsiahlu skupinu izolačných materiálov. Paleta je veľmi široká. Patria sem prírodné tuhé izolanty, ako napríklad celulóza, asfalty, živice, vosky, bitúmeny, a tiež syntetické tuhé izolanty (reaktoplasty, termoplasty, elastoméry). Každá z uvedených skupín má svoje dôležité miesto pri výrobe elektrotechnických materiálov. [10]

#### 5.1.1 Prírodné izolanty

Organické látky predstavujú zlúčeniny uhlíku, kyslíku, vodíku a do menšej miery aj ďalších prvkov. Ich mechanické vlastnosti sú vo veľmi značnej miere závislé na teplote. [6]

**Parafín a cerezín** – Vyrábajú sa zo zvyškov ropy po destilácii. Relatívnu permitivitu majú okolo 2,2-2,3, dielektrické straty  $(3-10) \cdot 10^{-4}$  pri  $15^\circ\text{C}$  a 1 kHz. Elektrickú pevnosť majú väčšiu ako 20 kV/mm. Veľmi podobné vlastnosti majú aj **bitumeny**, ktoré sa tiež vyrábajú z ropy. [6]

**Prírodné živice** – Sem patrí šelak, kalafuna, kopál a jantár. Tieto živice sú rastlinného alebo živočíšneho pôvodu. Sú mierne polárne, ich relatívna permitivita sa pohybuje v rozmedzí 2,3-3. Majú vysokú rezistivitu, číselne v rozmedzí  $10^{12}$ - $10^{15}$   $\Omega\text{m}$ . [6]

**Celulóza** – najmä z dôvodu nízkej ceny sú veľmi rozšírené tie izolačné materiály, ktorých základom je celulóza. Jedná sa o silne polárnu látku, relatívnu permitivitu má okolo 6,5-6,7 a stratový činiteľ okolo 0,005 až 0,01. Z celulózy sa vyrábajú najmä papierové a textilné izolácie. Rôzne druhy papiere, ako sú napríklad kondenzátorový alebo káblový papier, je možné získať z celulózy rôznym technologickým spracovaním a pridaním prísad. Pre zlepšenie elektrických vlastností papiera je ho nutné lakovať alebo impregnovat' olejom. Lakový papier má elektrickú pevnosť v rozmedzí 35 až 60 kV/mm a rezistivitu okolo  $10^{10}$   $\Omega\text{m}$ . Papier impregnovaný olejom je nenahraditeľnou izoláciou vvn káblov. [6]

### 5.1.2 Syntetické izolanty

Do skupiny syntetických organických izolantov patria väčšinou makromolekulárne hmoty. Ich molekuly môžu mať molekulovú hmotnosť až tisíce a ešte viac. Je ich možné podľa vlastností rozdeliť do troch skupín: elastomery, termoplasty a reaktoplasty. [6]

**Elastomery** sú pružné (elastické) látky. Vlastnosti elastomerov sa nelíšia veľmi od vlastností prírodnej gumy, ktorá má relatívnu permitivitu medzi 2,7-5,0 a stratový činiteľ 0,005 až 0,02. Prevádzkovú teplotu však majú vyššiu ako 75 °C. Používajú sa najmä v káblovom priemysle. [6]

**Termoplasty** sú len veľmi malou skupinou medzi všetkými tuhými izolačnými materiálmi. Avšak pre použitie v technike vysokého napätia sú práve termoplasty najpoužívanejšie látky, napríklad na izoláciu vodičov a káblov v distribučnej sústave. Termoplasty sú také plastické hmoty, ktoré pôsobením tepla mäknú a po ochladení tuhnú. Kvôli tejto vlastnosti sú v určitej teplotnej oblasti ľahko tvarovateľné a túto vlastnosť si zachovávajú. Proces ich tvrdnutia je reverzibilný, čo je veľkou výhodou oproti reaktoplastom. U termoplastov je dôležitá ich životnosť a odolnosť proti starnutiu. Pri použití termoplastov v elektrotechnike je potrebné sledovať ich fyzikálne vlastnosti na meniacej sa teplote a tiež frekvencie. Základné parametre niektorých termoplastov sú uvedené v Tab. 5-1. Kvôli vynikajúcim elektroizolačným vlastnostiam, ako napríklad vysoká elektrická pevnosť, nízke dielektrické straty sú termoplasty široko uplatňované napríklad v káblovom priemysle, vo výrobe elektroinštalčných materiálov atď. [3] [6]

Tab. 5-1 Vybrané vlastnosti niektorých termoplastov [6]

Chemický názov	Symbol	T <sub>MAX</sub> [°C]	log ρ [Ωm]	E <sub>p</sub> [kV.mm <sup>-1</sup> ]	ε <sub>r</sub> [-]	tg δ [-]
<b>Polyetylén</b>	PE	80-100	13-16	45-60	2,2-2,3	2,0.10 <sup>-4</sup>
<b>Polypropylén</b>	PP	120	10	80	2,3	1,0.10 <sup>-3</sup>
<b>Polyvinylchlorid</b>	PVC	65	12	40-50	3,1	1,5.10 <sup>-2</sup>
<b>Polyvinylchlorid mäkčený</b>	PVCm	65	9	50	3,4	1,2.10 <sup>-2</sup>
<b>Polystyrén</b>	PS	85	14	50	2,5	3,0.10 <sup>-4</sup>
<b>Polytetrafluoretylén</b>	PTFE	280	14	50	2,0	2,0.10 <sup>-4</sup>
<b>Polytrifluorchloretylén</b>	PTFCE	190	16	80	2,7	2,0.10 <sup>-2</sup>
<b>Polyamid</b>	PA	120	6-12	10-50	4-10	-
<b>Polykarbonát</b>	PC	100	12	20	3,7	4,0.10 <sup>-4</sup>
<b>Polyuretan</b>	PU	160	12	20	3,3-3,6	1,4.10 <sup>-2</sup>

**Polyetylén** je druhý najpoužívanejší elektroizolačný materiál zo skupiny termoplastov. Podľa výroby sa rozdeľuje do štyroch skupín: nízkotlakový, vysokotlakový, penový a zosieťovaný. Najviac sa osvedčuje vysokotlaková verzia polyetylénu. Najčastejšie sa používa na izoláciu vodičov a káblov. Z toho dôvodu, že jeho elektrické vlastnosti sa nemenia pri navlhnutí, polyetylén je vhodný k izolovaniu žíl káblov uložených vo vode a tiež ako materiál na plášte káblov.

Všeobecné vlastnosti PE:

- nízka hustota (0,89–0,965 g/cm<sup>3</sup>),
- vysoká pevnosť,
- dobrá klzkosť, nižšia odolnosť voči oteru,
- teplotná stálosť od –85 °C do +80 °C,
- veľmi dobré elektroizolačné vlastnosti (merný odpor približne 1 018 Ω·cm,
- dobre obrábateľný,
- malá priepustnosť vody,
- horľavý; zhorí bezo zvyšku na oxid uhličitý a vodu,
- odolný voči väčšine polárnych rozpúšťadiel (do teploty 60 °C), kyselinám, zásadám, alkoholom, olejom.

Polyetylén má vďaka veľkej symetrii a nepolárnemu charakteru polymerného reťazca výborné dielektrické a izolačné vlastnosti. Prítomnosťou polárnych látok sa však tieto vlastnosti – najmä stratový činiteľ – môžu výrazne zhoršiť. Vysokotlakový polyetylén oproti tomu nízkotlakovému neobsahuje ani stopové zvyšky katalyzátorov, preto má aj lepšie elektrické vlastnosti. Toto sa využíva najmä pri vysokých frekvenciách. Vysokotlakový polyetylén sa vyrába pri tlaku vyššom ako 111 MPa. Jeho pracovný rozsah je od -80 do +70 °C. Nízkotlakový polyetylén sa vyrába pri normálnom tlaku. Hustotu má väčšiu a je ho možné používať pri teplotách od -80 do +100 °C. Stredotlakový polyetylén sa vyrába pri teplote až 200 °C a pri tlaku 2 až 7 MPa. Je dokonale odolný proti navlhnutiu, relatívnu permitivitu má  $\epsilon_r=2,2-2,3$  a stratový činiteľ  $tg \delta = 2 \cdot 10^{-4}-6 \cdot 10^{-4}$ . Hodnota permitivity a stratového činiteľa skoro vôbec nie je závislá na frekvencii. [3] [11] [12]

**Polyvinylchlorid** je najrozšírenejší plast, patrí medzi najstaršie termoplasty. V oblasti elektrotechniky sa najbežnejšie používa mäkký polyvinylchlorid, ako náhrada za gumu. S silnoprádovej elektrotechnike sa používa predovšetkým na izolácie vodičov a káblov. Pre svoju polárnosť nie je vhodný na aplikáciu pri vysokých frekvenciách. Polyvinylchlorid sa vyrába polymeráciou vinylchloridu, ktorý sa získava z acetylénu a chlorovodíku. Čistý PVC nemá pevnú hodnotu teploty topenia, avšak pri teplote okolo 85 °C začína mäknúť. Nemäkký PVC (Novoplast, Igelit) sa využíva hlavne pri výrobe chemických zariadení. Pre elektrotechniku má oveľa väčší význam mäkký PVC, ktorý okrem vlastného polymeru obsahuje ešte množstvo zmäkčovadiel. Relatívna permitivita PVC sa pohybuje od  $\epsilon_r = 3$  až 5. Jeho stratový činiteľ je veľmi závislý na teplote, pohybuje sa v rozmedzí  $tg \delta = 180 \cdot 10^{-4}$  –  $1000 \cdot 10^{-4}$ . Silové káble s PVC izoláciou sa vyrábajú do 10 kV. [3] [12] [13]

**Reaktoplasty** sú také izolačné materiály, pri ktorých pôsobením tepla alebo pridaním chemických prísad dôjde k ich vytvrdeniu. Najdôležitejšími reaktoplastmi v elektrotechnike sú fenolformaldehydové živice, polyesterové a epoxidové živice a aminoplasty. Polyesterové a epoxidové živice majú permitivitu medzi 2,5-4, stratový činiteľ 0,01 a elektrickú pevnosť okolo 25 kV/mm [6]

## 5.2 Anorganické izolačné materiály

Anorganické izolačné materiály majú v porovnaní s organickými izolantmi radu výhodných vlastností. Sú to napríklad:

- odolnosť proti vysokým teplotám,
- vysoká chemická stabilita,



- nehorľavosť,
- odolnosť voči čiastkovým výbojom,
- starnutie je prakticky nulové. Len u niektorých typov vidieť degradáciu materiálu. [10]

### 5.2.1 Amorfne izolanty

**Sklo** – bežne používanými anorganickými izolantmi sú sklá. Jedná sa o silne polárne látky s relatívnou permitivitou 3,7 až 16 a viac. Rezistivita skla pri 20°C sa pohybuje v rozmedzí  $10^{12}$ - $10^{18}$   $\Omega\text{m}$ . Zvyšovaním teploty táto hodnota klesá. Bežné kremičité sklá majú pri 20°C hodnotu stratového činiteľa okolo  $(3-10) \cdot 10^{-3}$ . U nízko stratových skiel je táto hodnota 0,001. Zvyšovaním teploty hodnota stratového činiteľa exponenciálne rastie. Vo vysokonapäťovej technike sa používa borosilikátové sklo. [6]

### 5.2.2 Polykryštalické izolanty

Tieto hmoty sú zložené z veľkého množstva kryštálov. Veľká časť minerálnych látok sa vyskytuje v prírode. [6]

**Sľuda** – má veľmi dobré elektrické vlastnosti, prevažuje v ňom iónová polarizácia. Pri 50 Hz má hodnotu relatívnej permitivity okolo 3-7. Rezistivita sľudy sa pohybuje vo veľmi širokých medziach, približne od  $10^6$  až do  $10^{14}$   $\Omega\text{m}$ . Elektrickú pevnosť má 40 až 60 kV/mm. Táto elektrická pevnosť je nezávislá na teplote až do 400-450 °C. Dielektrické straty sa tiež pohybujú v širokom rozmedzí. Závisí od toho, že o aký typ sľudy sa jedná. Muskovit:  $(1-3) \cdot 10^{-4}$ , flogopit:  $(10-50) \cdot 10^{-4}$ . Dielektrické straty sú výrazne závislé na teplote a frekvencii. Pri nízkych frekvenciách stratový činiteľ rastie, pri vysokých klesá. [6]

**Keramika** – jedná sa o jednu z najdôležitejších polykryštalických elektrotechnických materiálov. Podľa typu a vlastností poznáme veľký počet keramik. V keramikách sa uplatňuje iónová relaxačná polarizácia, ktorá niekedy môže byť aj spontánna. Práve preto hodnoty relatívnej permitivity sa pohybujú na veľmi širokej škále, od jednotiek až do tisíce a ešte aj viac. Keramiky je možné rozdeliť podľa zloženia na kremičité a oxidačné hmoty. Medzi kremičité keramiky patrí porcelán, kamenina, steatit, forsterit, kordierit, ultraporcelán a celsián. Vo vysokonapäťovej technike sa najčastejšie používa steatit, ktorý je vhodný pre mechanicky obzvlášť namáhané izolátory. [6]

## 6 PRAKTICKÉ MERANIE

### 6.1 Popis vzoriek

V Tab. 6-1 sú uvedené vzorky polyetylénu a polyvinylchloridu, ktoré boli k dispozícii v laboratóriu VVN. Okrem týchto vzoriek boli ešte premerané aj iné pevné vzorky, ale o ich zložení nie sú k dispozícii podrobnejšie informácie. Jedná sa o rôzne typy papierov, pár druhov polystyrénu, plexisklá, gumy atď.

Tab. 6-1 Merané PE a PVC materiály v laboratóriu VVN

Látka č.	Materiál	Označenie	Zloženie
1	PE plášťový	HE 6062	100 % PE objemových
2	PE plášťový	HE 6063	100 % PE objemových
3	PE plášťový	HE 6063	98 % PE objemových, 2 % farbivo RED PEZ 340185Q
4	PE plášťový	HE 6063	92 % PE objemových, 8 % Retardant Y7108-FT-50FR
5	PE plášťový	ECCOH 5555	98 % PE objemových, 2 % farbivo 2001-OR-50
6	PVC izolačný	IS9-622	100 % PVC objemových
7	PVC izolačný	IS9-613	100 % PVC objemových
8	PVC izolačný	IS9-610	100 % PVC objemových
9	PVC izolačný	PS9-609	100 % PVC objemových
10	PE	LE 4423	95 % PE objemových, 5 % katalyzátor 4476

#### 6.1.1 HE 6062

Borstar HE6062 je čierna vysokohustotná zmes, ktorá sa vyrába s patentovanou Borstar bimodálnou technológiou. Borstar HE6062 je určený na oplášťovanie energetických a komunikačných káblov.

#### 6.1.2 HE6063

Borstar HE6063 je prírodná, UV-stabilizovaná, bimodálna vysokohustotná oplášťovacia zlúčenina, ktorá sa vyrába s patentovanou Borstar bimodálnou technológiou. Borstar HE6063 obsahuje dobre rozptýlený UV stabilizátor v dostatočnom množstve kvôli zabezpečenia odolnosti voči poveternostným vplyvom. Borstar HE6063 je určený na oplášťovanie energetických a komunikačných káblov.

#### 6.1.3 ECCOH 5555

Termoplastické nehalogénové zlúčeniny ECCOH sú vysoko odolné voči horeniu, a pri spaľovaní nevypúšťajú korozívne plyny. Nehalogénové PolyOne zložky ECCOH sú ideálne na

opláštenie drôtov a káblov, alebo ako základné izolácie. ECCOH 5555 vykazuje pozoruhodný výkon spracovania v rýchlostiach porovnateľnými s PVC.

#### 6.1.4 LE 4423

Visico 4423 je silanovo zosieťovateľný systém prírodných zlúčenín určený na izoláciu nízkonapäťových energetických káblov. Jedná sa o polyetylén s nízkou hustotou, kopolymerizovaný s vinylovým silánom. Je určený pre izoláciu nízkonapäťových energetických káblov do 6 kV.

### 6.2 Popis merania

Samotné praktické meranie pevných izolačných materiálov sa dá rozdeliť na dva hlavné časti. Pri prvom meraní bolo cieľom namerať čo najviac druhov pevných elektroizolačných materiálov, aby bol vytvorený komplexnejší pohľad na ich elektrické vlastnosti a na rozdiely medzi jednotlivými materiálmi. Z každej látky boli premerané 3 vzorky, aby mohla byť stanovená aj smerodajná odchýlka a variačný koeficient u jednotlivých materiáloch. Pri ďalšom meraní boli zisťované teplotné závislosti permitivity a stratového činiteľa pre 4 vybrané vzorky (3 PE, 1 PVC).

Meranie sa začalo tým, že bola zmeraná hrúbka jednotlivých vzoriek na viacerých rovnomerne rozložených bodoch, a potom sa z toho vypočítal priemer hrúbky, ktorú následne treba nastaviť na impedančnom analyzátoru, aby softvér pomocou tejto hodnoty vedel presne určiť jednotlivé elektrické parametre. Meranie hrúbky bolo prevedené pomocou mikrometru. Následne sa vzorka vložila do meracej bunky Tettex 2914 medzi elektródy a prítlačná sila elektród bola nastavená na konštantnú hodnotu  $5 \text{ N/cm}^2$ . Hodnota prítlačnej sily bola zvolená na základe normy a na základe príručky pre meráciu bunku. Pri vyššej prítlačnej sile by dochádzalo k eliminácii parazitných vzduchových medzier a pri vyššom teplotnom namáhaní by mohlo dôjsť k zničeniu materiálov.

Prvé meranie prebiehalo pri konštantnej teplote ( $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a konštantnej frekvencie, ale veľkosť napätia bola premenlivá pre jednotlivé materiály. Napríklad pri PS materiáloch bolo potrebné nastaviť maximálnu veľkosť napätia ( $2000 \text{ V}$ ), zatiaľ čo pri meraní kartónového papiera stačilo aj  $500 \text{ V}$ . Po pripojení napätia bolo potrebné počkať približne 5 minút, aby sa daná vzorka aklimatizovala pri teplote  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Po aklimatizácii sa zaznamenala veľkosť relatívnej permitivity a stratového činiteľa.

Postup bol podobný aj pri druhom meraní, avšak tu sa merala teplotná charakteristika relatívnej permitivity a stratového činiteľa medzi  $20$  a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Frekvencia ( $50 \text{ Hz}$ ), napätie ( $1500 \text{ V}$ ) a prítlačná sila ( $5 \text{ N/cm}^2$ ) bola konštantná po celej dobe merania.

Bolo v pláne aj meranie vnútornej rezistivity, avšak pri drvivej väčšine materiálov to nebolo možné kvôli citlivosti meracieho prístroja. Táto vlastnosť sa dala zmerať len u horších izolačných materiáloch a preto meranie vnútornej rezistivity bolo vyradené z praktického merania.

### 6.3 Vyhodnotenie merania

Pri meraní relatívnej permitivity a stratového činiteľa pri konštantnej teplote boli vybrané 3 vzorky z každého typu materiálu. Z nameraných hodnôt potom boli vypočítané priemerné hodnoty, smerodajné odchýlky a variačné koeficienty. Tieto hodnoty sú uvedené v Tab. 6-2.

Pre výpočet smerodajnej odchýlky platí vzťah:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (21)$$

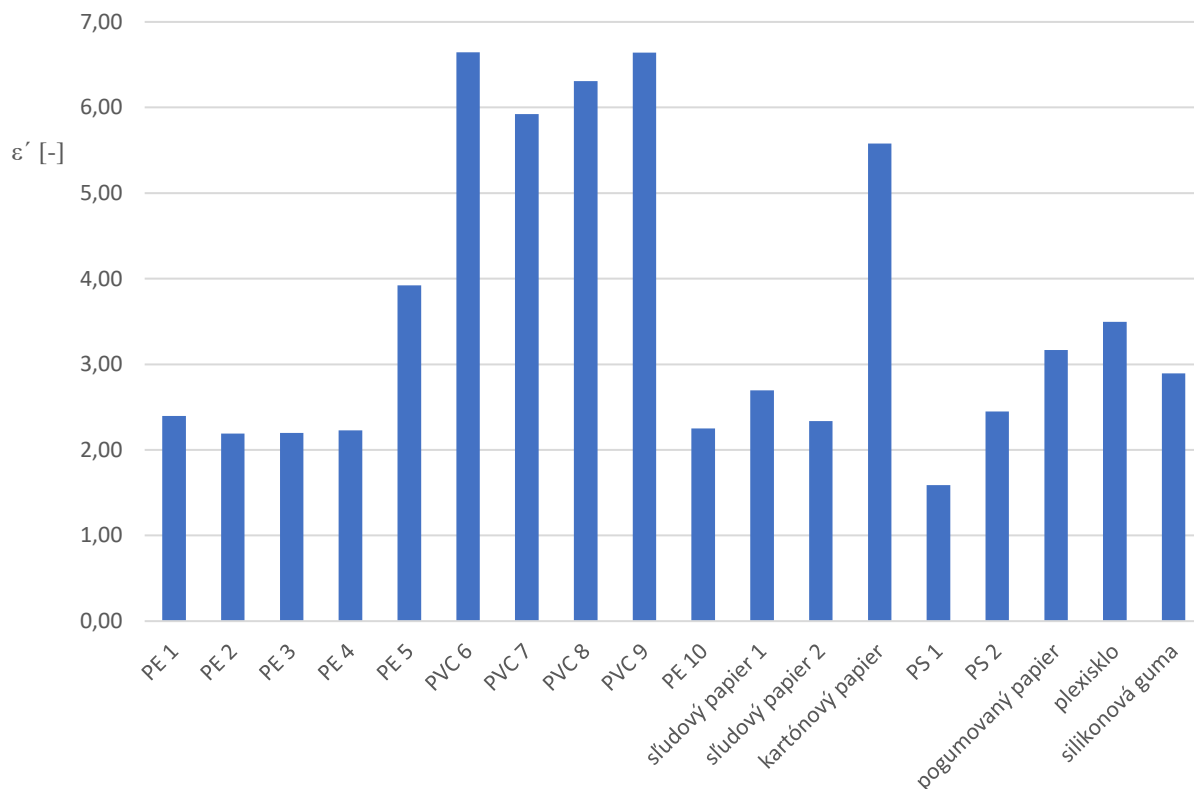
kde  $N$  je počet premeraných vzoriek,  $x_i$  je súbor hodnôt a  $\bar{x}$  je priemerná hodnota.

Vzorec pre variačný koeficient je:

$$V(x) = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (22)$$

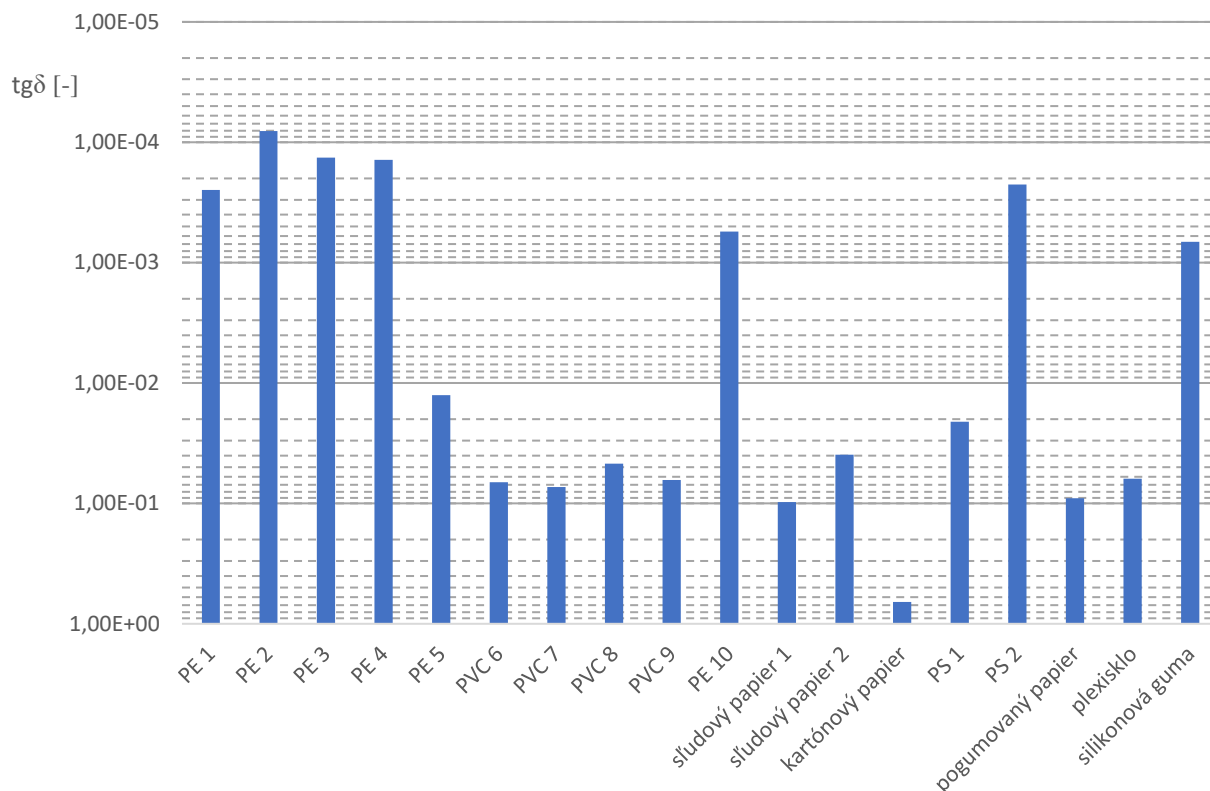
Tab. 6-2 Priemerné hodnoty, smerodajné odchýlky a variačné koeficienty pre jednotlivé pevné izolačné materiály

Materiál	U [V]	Priemerná hodnota		Smerodajná odchýlka		Variačný koeficient	
		tgδ [-]	ε' [-]	tgδ [-]	ε' [-]	tgδ [%]	ε' [%]
PE 1	1500	2,49E-04	2,40	1,82E-05	2,22E-02	7,30	0,93
PE 2	1500	8,07E-05	2,19	5,79E-06	2,21E-02	7,18	1,01
PE 3	1500	1,34E-04	2,20	1,82E-05	3,32E-02	13,51	1,51
PE 4	1500	1,40E-04	2,23	1,86E-05	1,46E-02	13,28	0,66
PE 5	1500	1,26E-02	3,92	9,74E-05	2,94E-03	0,77	0,08
PVC 6	1500	6,67E-02	6,65	4,08E-03	2,67E-02	6,13	0,40
PVC 7	1500	7,32E-02	5,93	9,95E-04	1,00E-01	1,36	1,69
PVC 8	1500	4,66E-02	6,31	2,73E-04	5,21E-02	0,58	0,83
PVC 9	1500	6,40E-02	6,64	6,17E-04	3,94E-02	0,96	0,59
PE 10	1500	5,53E-04	2,25	1,03E-05	3,60E-02	1,86	1,60
sľudový papier 1	1500	9,76E-02	2,70	5,03E-03	5,13E-02	5,15	1,90
sľudový papier 2	500	3,93E-02	2,34	6,36E-03	1,13E-01	16,17	4,85
kartónový papier	500	6,59E-01	5,58	7,58E-03	9,27E-02	1,15	1,66
PS 1	2000	2,09E-02	1,59	1,49E-04	1,63E-03	0,71	0,10
PS 2	2000	2,24E-04	2,45	3,29E-05	5,43E-02	14,70	2,22
pogumovaný papier	500	9,07E-02	3,17	2,35E-03	2,50E-02	2,59	0,79
plexisklo	1000	6,24E-02	3,49	1,13E-04	9,39E-03	0,18	0,27
silikónová guma	2000	6,71E-04	2,89	2,85E-05	9,03E-03	4,26	0,31



Obr. 6-1 Priemerné hodnoty nameranej relatívnej permitivity jednotlivých materiálov

Na Obr. 6-1 sú uvedené priemerné hodnoty nameranej relatívnej permitivity jednotlivých materiálov. Hodnota relatívnej permitivity je najnižšia u polystyrénu číslo 1 (1,59), naopak najvyššia hodnota bola nameraná u dvoch PVC materiáloch. Sú to PVC 6 a PVC 9, kde hodnota permitivity dosiahla hodnotu 6,64 a 6,65. Miera polarizácie je ešte vysoká u kartónovom papieri, u ostatných PVC materiáloch a u polyetylénu číslo PE 5.

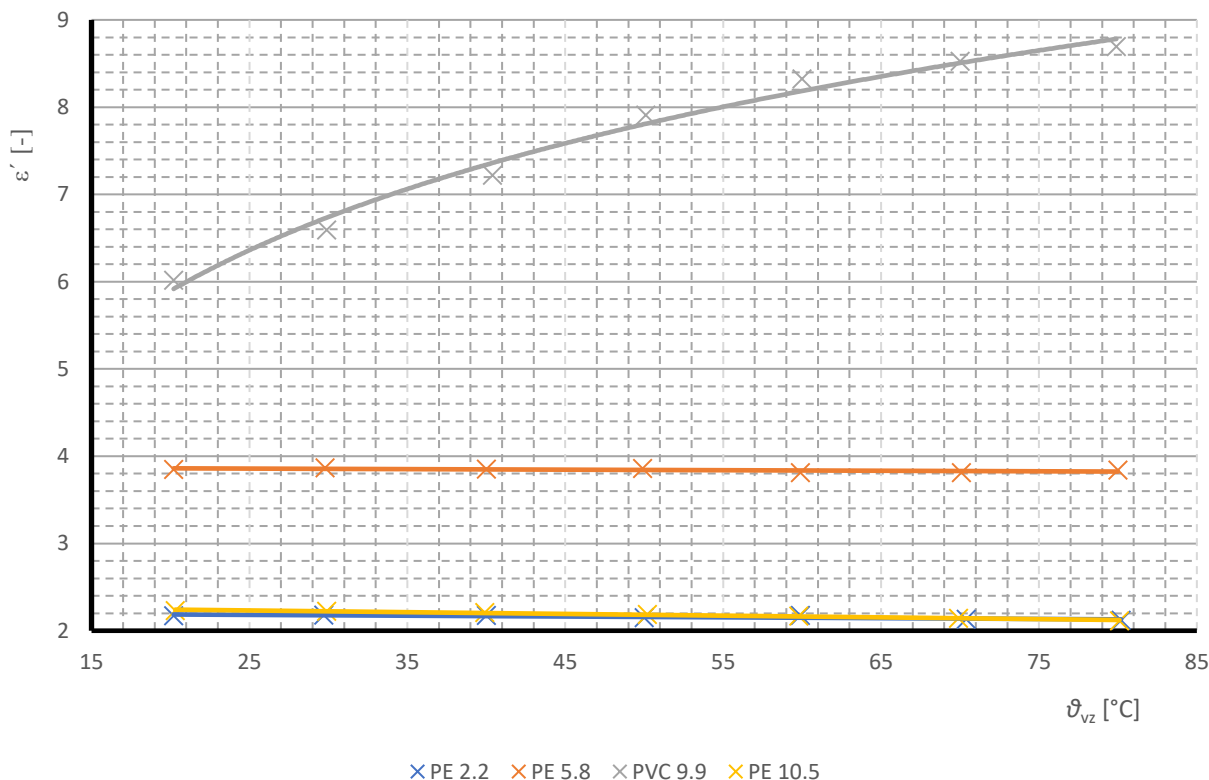


Obr. 6-2 Priemerné hodnoty nameraného stratového činiteľa jednotlivých materiálov

Na Obr. 6-2 sú uvedené priemerné hodnoty nameraného stratového činiteľa jednotlivých materiálov. Na základe grafu je možné konštatovať, že najvyššia hodnota stratového činiteľa bola nameraná u kartónovom papieri ( $6,59 \cdot 10^{-1}$ ). Z elektroizolačného hľadiska sa tento materiál považuje za špatný. Naopak najnižšia hodnota bola nameraná u polyetylénu číslo PE 2 ( $8,07 \cdot 10^{-5}$ ). Z elektroizolačného hľadiska sa tento materiál považuje za vysoko kvalitný. Materiály so stratovým činiteľom nižším, ako  $10^{-3}$  sa považujú za vysoko kvalitné, takže patria sem ešte PE 1, PE 3, PE 4, PE 10, PS 2 a silikónová guma. Materiály so stratovým činiteľom vyšším, ako  $10^{-2}$  sa považujú za špatné. Okrem už zmieneného kartónového papiera žiaden zo zmeraných materiálov nemá takú vysokú hodnotu.

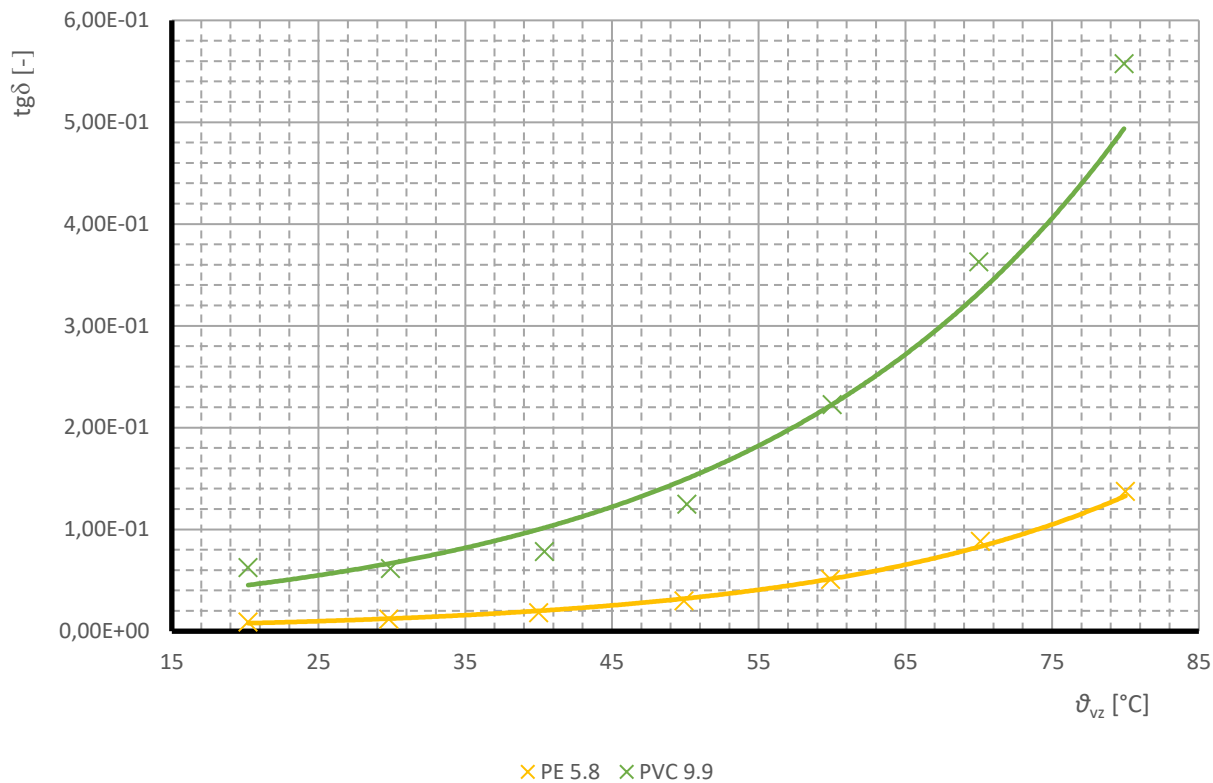
Tab. 6-3 Namerané hodnoty relatívnej permitivity a stratového činiteľa pri zvyšovanej teplote

PE 2.2					PE 5.8				
$U$ [V]	$f$ [Hz]	$\vartheta_{vz}$ [°C]	$tg\delta$ [-]	$\epsilon'$ [-]	$U$ [V]	$f$ [Hz]	$\vartheta_{vz}$ [°C]	$tg\delta$ [-]	$\epsilon'$ [-]
1500	50,0	20,2	5,20E-05	2,174	1500	50,1	20,2	9,00E-03	3,850
1500	50,1	29,7	6,40E-05	2,181	1500	50,1	29,8	1,17E-02	3,867
1500	50,1	40,0	5,70E-05	2,175	1500	50	40,0	1,81E-02	3,854
1500	50,1	50,0	5,40E-05	2,151	1500	50,1	49,9	2,99E-02	3,860
1500	50,1	59,9	4,30E-05	2,175	1500	50,1	59,9	5,07E-02	3,812
1500	50,1	70,4	4,30E-05	2,131	1500	50,1	70,1	8,83E-02	3,812
1500	50,1	80,2	3,50E-05	2,120	1500	50,1	80,0	1,37E-01	3,843
PVC 9.9					PE 10.5				
$U$ [V]	$f$ [Hz]	$\vartheta_{vz}$ [°C]	$tg\delta$ [-]	$\epsilon'$ [-]	$U$ [V]	$f$ [Hz]	$\vartheta_{vz}$ [°C]	$tg\delta$ [-]	$\epsilon'$ [-]
1500	50,1	20,2	6,23E-02	6,019	1500	50,1	20,3	7,49E-04	2,230
1500	50,1	29,9	6,16E-02	6,595	1500	50,0	29,9	5,39E-04	2,224
1500	50,1	40,4	7,82E-02	7,221	1500	50,0	39,9	3,17E-04	2,211
1500	50,1	50,1	1,25E-01	7,912	1500	50,0	50,2	2,17E-04	2,188
1500	50,0	60,0	2,22E-01	8,325	1500	50,1	59,8	2,27E-04	2,169
1500	50,1	70,0	3,63E-01	8,526	1500	50,1	69,9	2,57E-04	2,144
1500	50,1	79,9	5,57E-01	8,695	1499	50,1	80,1	3,33E-04	2,113



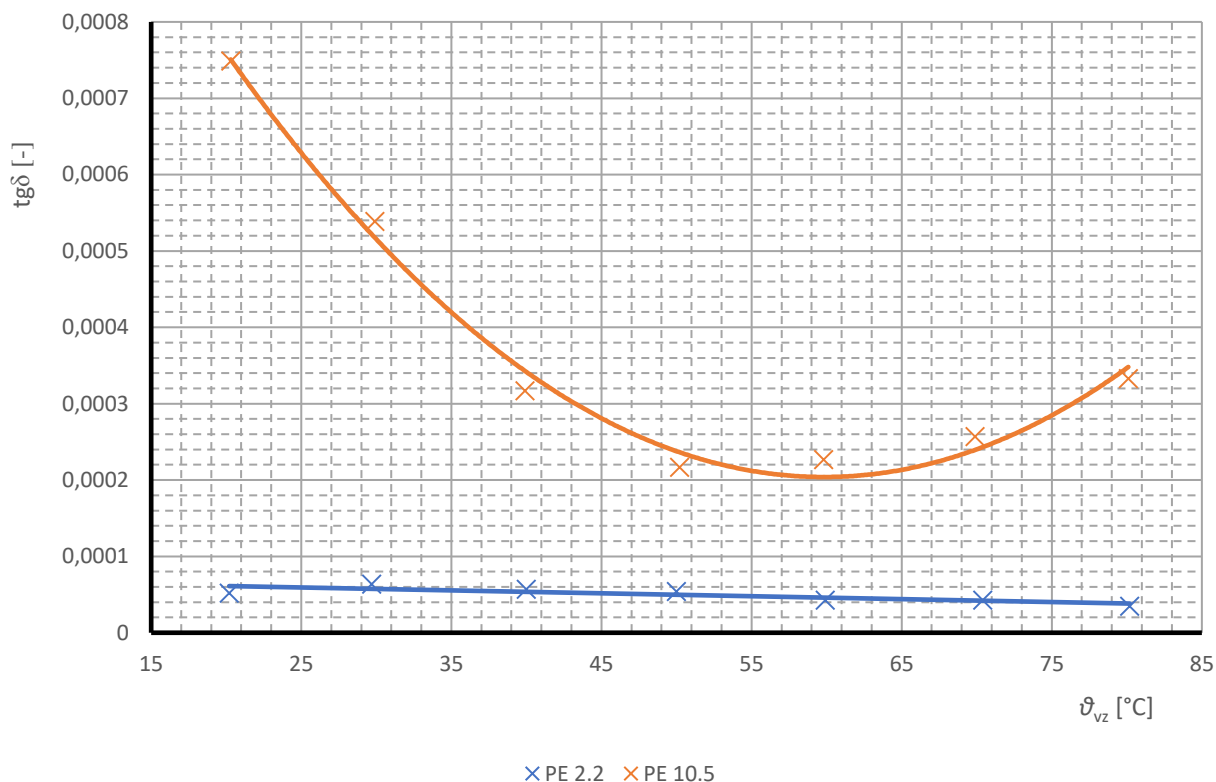
Obr. 6-3 Závislosť relatívnej permitivity na teplote PE a PVC vzoriek pri napätí 1500 V a frekvencii 50 Hz

Na Obr. 6-3 je uvedená závislosť relatívnej permitivity na teplote pri konštantnom napätí 1500 V a konštantnej frekvencii 50 Hz. Z grafu je vidieť, že pri rastúcej teplote u PE vzoriek je relatívna permitivita skoro konštantná a u vzorky PVC logaritmicke stúpa. V uvedenom teplotnom rozsahu relatívna permitivita dosahuje najvyššie hodnoty u vzorky PVC 9.9 (6,0-8,7). Najnižšie hodnoty boli namerané u vzorky PE 2.2 (konštantných 2,2).



Obr. 6-4 Závislosť stratového činiteľa na teplote jednej PE a jednej PVC vzorky pri napätí 1500 V a frekvencii 50 Hz





Obr. 6-5 Závislosť stratového činiteľa na teplote PE vzoriek pri napätí 1500 V a frekvencii 50 Hz

Na Obr. 6-4 a na Obr. 6-5 sú zobrazené závislosti stratového činiteľa na teplote pri konštantnom napätí 1500 V a konštantnej frekvencii 50 Hz. U vzorky PVC 9.9 a PE 5.8 je vidieť, že rastúcou teplotou tiež rastie veľkosť stratového činiteľa. Krivka závislosti je u týchto vzoriek exponenciálna. U vzorky PE 10.5 je táto závislosť parabolická a u vzorky 10.5 je veľkosť stratového činiteľa pri každej teplote skoro rovnaká (len minimálne klesá). Najväčší vplyv teploty a zároveň aj najhoršie výsledky sú pozorovateľné u vzorky PVC 9.9. Naopak najlepšie výsledky sú namerané u vzorky PE 2.2. V celom meranom rozsahu je jeho stratový činiteľ nižší ako 0,0001.

## 7 ZÁVER

Teoretická časť bakalárskej práce sa zaoberá s teóriou elektrických parametrov pevných izolačných materiálov, ako sú vnútorná rezistivita, relatívna permitivita, stratový činiteľ, či elektrická pevnosť. Ďalej sú popísané jednotlivé meracie metódy na základe platných príslušných technických noriem. A napokon posledná kapitola teoretickej časti sa zaoberá rozdelením pevných izolačných materiálov, sú vyjasnené očakávané výsledky na základe odbornej literatúry.

Praktické meranie prebiehalo v laboratóriu VVN vo vedecko technickom parku profesora Lista. Bolo pripravených 18 rôznych materiálov a z každého boli premerané 3 vzorky pri konštantnej teplote, konštantného tlaku a konštantnej frekvencie. Následne bola premeraná teplotná závislosť relatívnej permitivity a stratového činiteľa štyroch vybraných vzoriek. Pri tomto meraní bola konštantná frekvencia, napätie a tlak elektród. Celé meranie elektrických parametrov prebiehalo pomocou impedančného analyzátoru Tettex 2830/2831, ktorý bol spojený s meracou bunkou pre pevné izolačné materiály Tettex 2914 podľa platnej technickej normy ČSN IEC 250.

Po vyhodnotení merania je možné konštatovať, že medzi vybranými materiálmi je najkvalitnejším izolantom polyetylén číslo 2, jeho stratový činiteľ je nižší, ako  $10^{-4}$ . Medzi kvalitné materiály môžeme zaradiť aj ostatné merané materiály, okrem kartónového papiera, ktorý má stratový činiteľ vyšší, než  $10^{-2}$ . Zaujímavý je polyetylén číslo 5. Teplotnú závislosť permitivity má rovnako lineárnu, ako ostatné polyetylény, ale stratový činiteľ s rastúcou teplotou u tohto materiálu exponenciálne stúpa, pričom u ostatných polyetylénov buď mierne klesá, alebo je skoro konštantná. Exponenciálnu závislosť je možné pozorovať ešte u látky PVC. Dôvodom je to, že polyetylén číslo 5 je taký typ polyetylénu, ktorý pri zvýšení teploty rýchlo začne mäknúť a práve preto stúpa hodnota stratového činiteľa skoro tak prudko, ako pri PVC materiáloch.

V porovnaní s teoretickými hodnotami na základe prístupnej odbornej literatúry všetky namerané hodnoty sa pohybujú v takých medziach, aké boli predpokladané, resp. teória bola potvrdená.

Budúce akademické práce by sa mohli zaoberať meraním frekvenčnej charakteristiky elektrických parametrov pri rôznych teplotách. Ďalej by sa mohla skúmať aj vnútorná rezistivita v závislosti na teplote, napätia, frekvencie, alebo tlaku, avšak s pomocou impedančného analyzátoru Tettex 2830/2831 je to ťažké kvôli citlivosti prístroja. Sú k tomu potrebné vzorky s oveľa menšou hrúbkou, aby tento experiment mohol byť úspešný.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] ČSN IEC 93. *Metody měření vnitřní rezistivity a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů*. Praha: Český normalizační institut, 1993, 17 s.
- [3] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály a technologie v elektronice a elektrotechnice*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5675-9.
- [4] ČSN IEC 250. *Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek*. Praha: Český normalizační institut, 1997, 30 s.
- [5] KRBAL, Michal. *Technika vysokých napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015.
- [6] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03191-8.
- [7] PELIKÁN, Luděk. *Měření částečných výbojů u vysokonapěťových kabelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018, 82 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Michal Krbal, Ph.D.
- [8] *Operating Instructions - Tettex 2830/2831 Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer* [online]. Version 2.0. Switzerland: Haefely Test AG, 2013 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://update.haefely.com/CT2830/>
- [9] HORÁK, Luděk. *Analýza elektrických vlastností epoxidových pryskyřic s různými plnivy v teplotní a kmitočtové závislosti*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
- [10] POLJAK, František. *Štruktúra a vlastnosti materiálů II: izolanty a dielektriká*. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická, 1986.
- [11] Polyetylén [online]. *b.r.* [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Polyetyl%C3%A9n>
- [12] ŠKEŘÍK, Jan. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-030-0657-0.
- [13] DRÁPALA, Jaromír. *Materiály pro elektrotechniku: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3598-3.