



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC

DIELECTRIC PROPERTIES OF EPOXY RESINS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Klára Matoušová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

BRNO 2019

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

**Studentka:** Bc. Klára Matoušová

**ID:** 173698

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Dielektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte základy chemických a fyzikálních vlastností dielektrických materiálů se zaměřením na epoxidové pryskyřice. Seznamte se s vybranými diagnostickými metodami a navrhnete vhodnou metodiku měření vlastností předložených vzorků epoxidových pryskyřic v teplotní a kmitočtové závislosti.

U předložených vzorků proveďte měření relativní permitivity a ztrátového činitele v závislosti na teplotě a kmitočtu v rozsahu teplot 25 až 120 °C a v rozsahu kmitočtů 10 Hz až 10 kHz.

Dále u předložených vzorků proměřte závislost vnitřního odporu na teplotě v rozsahu teplot 25 až 120 °C.

Porovnejte dosažené výsledky s teoretickými předpoklady a zhodnoťte vlastnosti vybraných materiálů.

Sepište zprávu o dosažených výsledcích.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 21.5.2019

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Bača, 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.



## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá základními vlastnostmi epoxidových směsí, jelikož určení základních parametrů připravené epoxidové směsi by v případě příznivých výsledků mohlo vést ke snížení počtu vad v epoxidem zalévaných přístrojových transformátorech. Jelikož působení vlivů v průběhu výroby transformátorů, způsobující nekvalitu, je velmi rozsáhlé, je největší důraz kladen právě na vliv složení epoxidové licí směsi. V práci je popsána technologie výroby včetně používaných metod a materiálů. Dále složení epoxidových pryskyřic a mechanismy při jejich vytvrzování. Rovněž jsou zahrnuty definice základních vlastností dielektrických materiálů a popis diagnostických metod sloužících k určování permitivity, ztrátového činitele a vnitřní rezistivity. V rámci experimentální části byly stanoveny a vysušeny vhodné odlitky získaných vzorků a následně byla provedena měření základních elektrických vlastností v teplotních a kmitočtových závislostech. Dále následuje srovnání jednotlivých sad vzorků a zhodnocení jejich elektrických vlastností.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Přístrojové transformátory, dielektrika, reaktoplasty, elektroizolační hmoty, epoxidové pryskyřice, elektrické vlastnosti, rezistivita, permitivita, ztrátový činitel, SYNPO a.s., ABB s.r.o.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the fundamental properties of epoxide mixtures, as determining of these fundamental properties of epoxide mixtures could in the case of favorable results lead to diminishing the amount of defects in epoxide-embedded instrument transformers. As the influence of effects in the manufacturing process of transformers causing poor quality is very extensit, the biggest emphasis is laid capitally on the influence of the epoxide casting mixture composition. The thesis describes the manufacture technology including used methodics and materials. The compositions of epoxide resins and the mechanisms of their curing. Also, the definitions of fundamental properties of dielectric materials and the description of diagnostic methods used to relative permitivity, dissipation factor and inner resistivity are included. suitable casts of acquired samples were set and dried out within the experimental part, followed by measurement of fundamental electrical properties in temperature and frequency relations. Hereafter a comparison of individual samples and the evaluation of their electrical properties will be carried out.

## **KEYWORDS**

Instrument transformer, dielectric materials, thermosets, electrical insulation materials, epoxy resins, electrical properties, resistivity, permitivity, dissipation factor, SYNPO a.s., ABB s.r.o.

MATOUŠOVÁ, K. Dielektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 83 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Kazellemu, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji konzultantu Ing. Pavlu Oujezdského z firmy ABB s.r.o. za zajištění vzorků od firmy SYNPO a.s. a cenné rady při vyhodnocování mé diplomové práce.

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>1 Přístrojové transformátory</b>	<b>9</b>
1.1 Používané technologie ve firmě ABB s.r.o. ....	10
1.1.1 Vakuové lití.....	10
1.1.2 Tlakové lití.....	10
<b>2 Materiály izolačního systému</b>	<b>11</b>
2.1 Materiály pro bandážování přístrojových transformátorů.....	11
2.2 Izolační materiály přístrojových transformátorů .....	11
2.3 Epoxidová pryskyřice.....	11
2.3.1 Složky epoxidové pryskyřice .....	12
2.3.2 Proces vytvrzování .....	12
2.3.3 Metody vytvrzování .....	13
<b>3 Vlastnosti dielektrických materiálů</b>	<b>14</b>
3.1 Komplexní permitivita .....	14
3.1.1 Relativní permitivita .....	16
3.2 Dielektrická polarizace .....	16
3.3 Dielektrické ztráty .....	17
3.3.1 Ztrátový činitel.....	17
3.4 Elektrická pevnost.....	18
3.5 Rezistivita .....	19
3.5.1 Povrchová rezistivita .....	19
3.5.2 Vnitřní rezistivita.....	19
3.6 Elastická deformace .....	20
3.7 Vlhkost .....	20
3.7.1 Vlhkost vzduchu.....	21
3.8 Absorpce vlhkosti.....	22
3.8.1 Navlhavost .....	22
3.8.2 Vliv vlhkosti na vlastnosti epoxidových pryskyřic .....	22
3.9 Tepelné vlastnosti.....	23
3.9.1 Vliv teploty na vlastnosti epoxidových pryskyřic.....	23

<b>4 Diagnostické metody</b>	<b>24</b>
4.1 Impedanční spektroskopie .....	24
4.2 Metoda Wheatstonova můstku.....	25
4.3 Voltampérová metoda .....	25
4.4 Měření se Scheringovým můstkem.....	26
4.5 Měření pomocí Q-metru .....	27
<b>5 Experimentální část</b>	<b>28</b>
5.1 Příprava vzorků .....	28
5.2 Realizovaná měření a jejich vyhodnocení.....	28
5.3 Přístroje použité pro realizaci praktické části .....	39
5.3.1 Digitální třmenový mikrometr Schut .....	39
5.3.2 Horkovzdušný sterilizátor BMT Stericell 111 .....	40
5.3.3 Exsikátor .....	40
5.3.4 Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831 .....	41
5.3.5 Měřicí přípravek Tettex 2914 pro pevné dielektrické materiály.....	42
5.3.6 Širokopásmový impedanční analyzátor Novocontrol Technologies...43	
5.3.7 Agilent 4339B Resistance Meter .....	44
5.3.8 Agilent 16008B Resistivity Cell .....	44
<b>6 Závěr</b>	<b>46</b>
<b>Literatura</b>	<b>50</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>53</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>55</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>57</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>58</b>

# ÚVOD

V provozech zaměřených na výrobu elektrotechnických zařízení je nutné zajistit spolehlivost a kvalitu výrobků. Tyto požadavky mohou být ohroženy nesprávnou technologií výroby, kvalitou či vlastnostmi použitých látek a materiálů. Kvalita a spolehlivost produktů výrazně ovlivňuje konkurenceschopnost na trhu a také snižuje náklady spojené s hrazenými opravami v záruční době.

Firma ABB s.r.o. je mezinárodní firma a také přední dodavatel elektrotechnických výrobků, jako jsou transformátory, rozvaděče či řídicí systémy. Kvalita těchto produktů je mnohdy stěžejní pro spolehlivý přenos elektrické energie. Brněnská pobočka této firmy se zabývá výrobou nejen rozvaděčů a senzorů vysokého napětí, ale i přístrojových transformátorů.

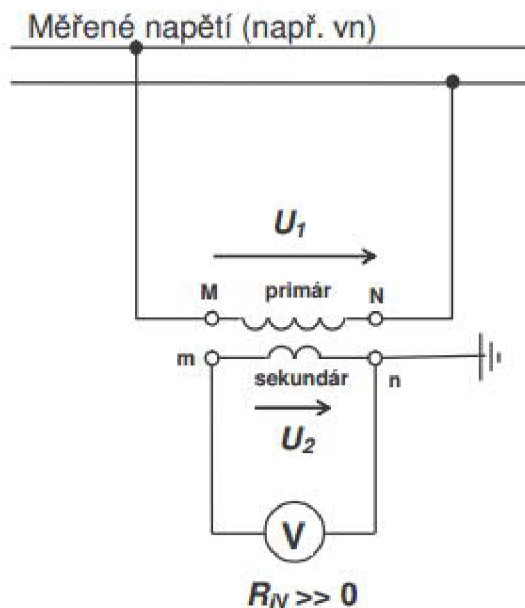
Cílem této práce je prověření elektrických vlastností epoxidových licích hmot, jehož výsledky mohou vést k celkovému zlepšení kvality přístrojových transformátorů. Během procesu lití v epoxidem zalévaném transformátoru je stěžejní použití vhodné epoxidové směsi, u níž je důležitý poměr a druh jednotlivých používaných složek. V případě zvolení nevhodných složek či jejich poměru, může dojít nejen ke špatné homogenitě směsi, což způsobí nedostatečné zalití všech částí formy, ale také ke změně důležitých elektrických vlastností odlitého transformátoru. Předmětem práce bude tedy u předložených vzorků epoxidových pryskyřic s různým druhem použitého flexibilizátoru měření určit vlastností v teplotní a kmitočtové závislosti. Konkrétně bylo realizováno měření relativní permitivity a ztrátového činitele v závislosti na teplotě a kmitočtu v rozsahu teplot 25 °C až 120 °C a dále závislost vnitřního odporu na teplotě v témže teplotním rozsahu. Výsledným výstupem z diplomové práce zahrnuje srovnání elektrických vlastností předložených vzorků, mezi nimiž se vyskytuje také vytvrzený vzorek současně používané licí hmoty. Při zjištění příznivějších hodnot ve srovnání se současně používanou licí hmotou bude vzorek konzultován ve firmě a případně doporučen pro použití při výrobě přístrojových transformátorů proudů a napětí ve firmě ABB s.r.o. Tento krok by mohlo vést ke zvýšení jakosti současných výrobků, a tudíž i ke značným finančním a časovým úsporám způsobených nedostatečnou kvalitou a následnou reklamací produkovaných přístrojových transformátorů.

# 1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Společnost ABB s.r.o. se v brněnské pobočce zabývá výrobou přístrojových transformátorů proudu a napětí. Přístrojové transformátory jsou stěžejními prvky přenosových a distribučních soustav. Tyto transformátory slouží ke změně hodnot velkých střídavých napětí a velkých střídavých proudů na hodnoty vhodné pro měřicí přístroje za současného galvanického oddělení měřeného obvodu a obvodu měřicího přístroje.

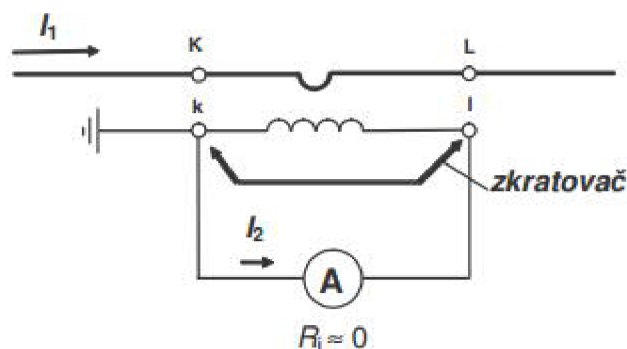
Základními částmi transformátoru jsou jádro, vinutí a izolační systém. Přístrojový transformátor se skládá z primární a sekundární cívky na ocelovém jádře, které je pro obě cívky společné. Princip fungování transformátorů je založen na fyzikálním jevu elektromagnetické indukce. Primární vinutí je připojeno ke zdroji střídavého proudu, který v jádře generuje proměnné magnetické pole o indukčním toku  $\Phi_1$ . Sekundární vinutí napájí obvody měřicích přístrojů.

U měřicího transformátoru napětí je primární vinutí paralelně zapojeno k měřenému obvodu. Sekundární vinutí je zapojeno k voltmetru s velkým vnitřním odporem, tzn. že přístrojový transformátor napětí pracuje stejně jako při stavu naprázdno. Schéma zapojení je na obr. 1. [1]



Obr. 1: Schéma zapojení měřicího transformátoru napětí [1]

V případě přístrojového transformátoru proudu je primární vinutí v sérii s měřeným obvodem a sekundární vinutí je připojeno k ampérmetru s co nejmenším odporem, takže měřicí transformátor proudu pracuje ve stavu nakrátko. Schéma zapojení je na obr. 2.



Obr. 2: Schéma zapojení přístrojového transformátoru proudu [1]

Oba typy přístrojového transformátoru lze využít i pro měření činného výkonu wattmetrem.

## 1.1 Používané technologie ve firmě ABB s.r.o.

Ve firmě ABB s.r.o. jsou proudové i napěťové přístrojové transformátory zalévány epoxidovou pryskyřicí dvěma možnými technologiemi – tlakovým nebo vakuovým litím.

### 1.1.1 Vakuové lití

V případě technologie vakuového lití se primární i sekundární vinutí upevní do kompletní formy. Takto připravené transformátory jsou předehřívány v tunelu při teplotě 90 °C po dobu 6 hodin. Následně se zalévají ve vakuové komoře (10 min) a vytvrzují se přibližně 2 hodiny. Po vytvrzení následuje vyjmutí z formy a poté se transformátory převezou do dotvrzovacího tunelu rozděleného na 6 sekcí s teplotami 90 °C, 110 °C, 110 °C, 110 °C, 110 °C a poslední sekce je vypnutá. V této části procesu se epoxid stabilizuje po dobu cca 16 hodin. [2]

### 1.1.2 Tlakové lití

Modernější a efektivnější technologií pro výrobu přístrojových proudových a napěťových transformátorů je proces tlakového odlévání neboli metoda APG (Automatic pressure gelation).

Jde o modifikaci reakčního vstřikování, zkráceně RIM. V porovnání s RIM je pro metodu APG potřeba nižšího tlaku (do 0,3 MPa) a stěny výrobků mohou být řádově vyšší, což ale prodlužuje dobu výroby. V procesu tlakového lití se využívá nekompletní formy. Forma s funkčními částmi se předehřívá po dobu 6 hodin. Následné lití probíhá v šikmé poloze transformátoru umístěného mezi topné desky tlakového stroje a do formy je tlačen epoxid z míchacího zařízení. V tlakovém stroji přibližně za hodinu dojde k vytvrzení odlitku. Nyní má firma ABB s.r.o. i tlakové licí stroje, u kterých je možno použít kombinace tlakového lití pod vakuem. Pokračující proces je shodný jako u vakuového lití. [3]



## **2 MATERIÁLY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU**

Hlavními ukazateli izolačního systému jsou průrazné napětí, teplotní třída materiálu, permitivita, ztrátový činitel, vnější a vnitřní rezistivita. Velkou roli hrají klimatické podmínky jako je vlhkost, teplota, sluneční záření a také chemické vlivy.

### **2.1 Materiály pro bandážování přístrojových transformátorů**

- Bavlněné tkanice.
- Polovodivé pásy na bázi krepového papíru.
- Polovodivé pásy na bázi fleecu.
- Mikroporézní pryž (neopren, epdm).
- Impregnované papíry.

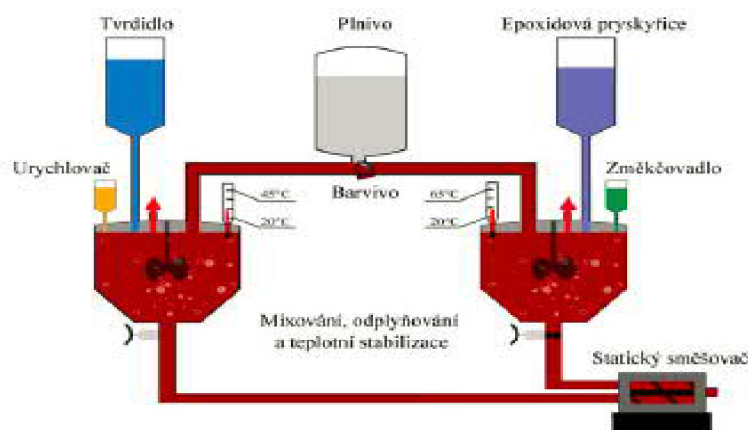
### **2.2 Izolační materiály přístrojových transformátorů**

- Izolační lamináty (DMD, Trivolton H, Trivolton HP).
- Kartitové trubky.
- Epoxidová pryskyřice.

### **2.3 Epoxidová pryskyřice**

Epoxidová pryskyřice je polymerní látka, konkrétně reaktoplast. Reaktoplasty vytvářejí prostorově zesílené struktury vlivem působení tepla, záření, nebo síťovacích činidel. Po vytvrzení se reaktoplasty stávají netavitelnými a nerozpustnými. Výroba epoxidových pryskyřic probíhá už přes 50 let a našly mnoho využití od lepidel a nátěrů, přes povrchové úpravy, až po aplikace v lodním, automobilovém a elektrotechnickém průmyslu. [4]

V elektrotechnické výrobě jsou epoxidové pryskyřice hojně využívány jako elektroizolační zalévací hmoty skládající se z několika hlavních částí, které se pro chtěné vlastnosti musí míchat v přesně určeném poměru. Schéma přípravy licí směsi je na obr. 3.



Obr. 3: Příprava epoxidové lící hmoty [4]

### 2.3.1 Složky epoxidové pryskyřice

**EPOXID** – základní složka.

**TVRDILO** je nutnou součástí polymerní reakce, díky které se struktura pryskyřice zesílí. Dle toho, zda se tvrdidla stanou, či nestanou součástí této sítě, je dělíme na polyadiční (polyfenoly, anhydridy, polykyseliny, polyamidy, polyaminy...) a polymerační (diethylentriamin, dipropylentriamin). [5]

**PLNIVO** je aditivum, které ovlivňuje nejen mechanické, teplotní, elektrické, povrchové vlastnosti, ale i životnost a cenu. Jako plnivo se využívá většinou křemičitý písek.

**URYCHLOVAČ** slouží ke zrychlení průběhu zesíťování. Nejvíce využívané a nejúčinnější pro urychlování polymerní reakce jsou aminy.

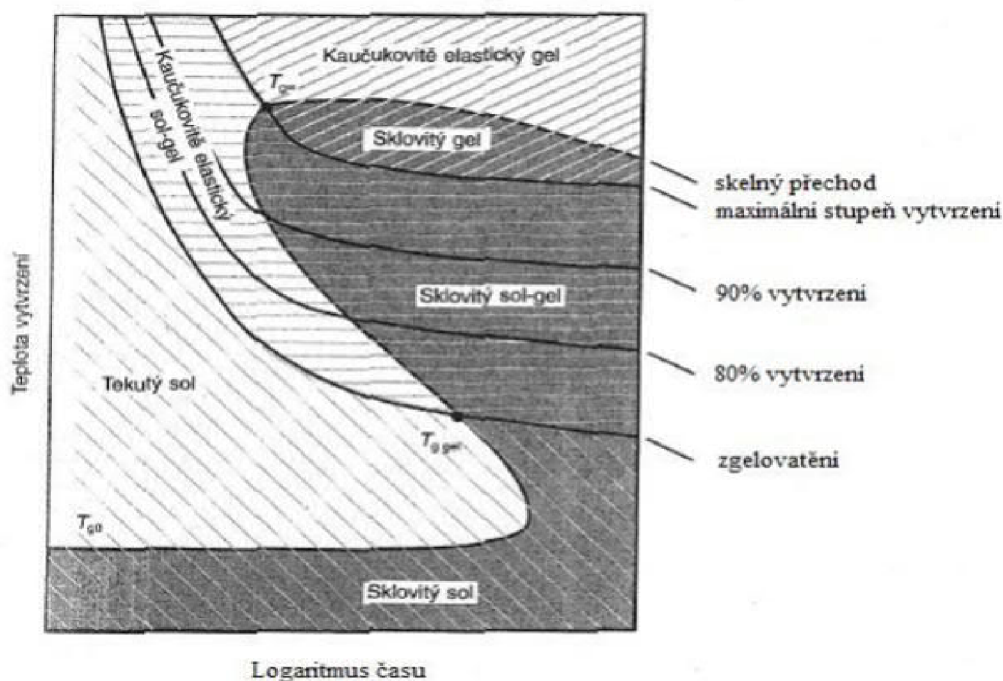
**BARVIVO** se přidává pouze pro estetické rozlišení, čistá pryskyřice je totiž čirá. K barvení se používají prášky organické (tepelně stálé pigmenty), nebo anorganické (křída, grafit, kadmiová červeň, chromová žlut' a oranž).

**ZMĚKČOVADLO** neboli flexibilizátor, je přísada zvyšující tvárnost, ohebnost a houževnatost a vnitřní pohyblivost makromolekul, což vede k snížení teploty skelného přechodu, dále snižují i viskozitu. Jde například o fosfátové a ftalátové kyseliny a estery mastných kyselin.

### 2.3.2 Proces vytvrzování

Důležitým faktorem při zpracování epoxidových pryskyřic je vytvrzování. Jde o chemický proces, při němž dojde ke změně nízkomolekulárních rozpustných a tavitelných monomerů a oligomerů epoxidu na netavitelné a nerozpustné polymery s trojrozměrnou strukturou.

Změna tekuté epoxidové pryskyřice na gel nastává po překročení bodu gelace a nazývá se „želatinace“. Úplné vytvrzení probíhá po překročení teploty skelného přechodu a epoxidové pryskyřice následně získávají nové vlastnosti, mezi něž patří mechanická a tepelná odolnost, elasticita a další. Chování pryskyřice během vytvrzování je zobrazeno v TTT diagramu na obr. 4. Jde o zobrazení stupně vytvrzení reakční směsi v daném čase a teplotě. Vliv na proces vytvrzování má i druh tvrdidla, např. pryskyřice vytvrzená anhydridy dikarboxylových kyselin je méně navlhavá z důvodu nižší koncentrace hydroxylových skupin. Vlhkost je v procesu zalévání velice nežádoucí faktor, její přítomnost může vytvořit vzduchové bublinky, které následně způsobují částečné výboje. [6]



Obr. 4: TTT diagram [6]

### 2.3.3 Metody vytvrzování

**POLYADICE NA EPOXIDOVÝCH SKUPINÁCH** – jde o reakce na koncových skupinách, kde jsou polymeračním činidlem sloučeniny s volnými vodíkovými atomy. Z jedné skupiny se uvolní proton a nechá na ní volný elektronový pár.

**POLYKONDENZACE NA PŘÍTOMNÝCH HYDROXYLOVÝCH SKUPINÁCH** – dochází k odštěpení vody. Vznik makromolekuly probíhá současně s kondenzací dvou a více funkčních monomerů.

**POLYMERACE EPOXIDOVÝCH SKUPIN** – probíhá při vytvrzování polyaminy, kdy jde o vytvrzení za běžné teploty při použití cykloalifatických polyaminů a vícefunkčních thiolů, a anhydridy karboxylových kyselin, kdy se vytvrzení uskutečňuje při teplotách 100 až 200 °C. Právě vytvrzování anhydridy karboxylových kyselin se využívá v elektrotechnickém průmyslu pro laminační, zalévací a impregnační hmoty či nátěrové hmoty.

## 3 VLASTNOSTI DIELEKTRICKÝCH MATERIÁLŮ

V elektrotechnickém průmyslu používané dielektrické materiály mají své charakteristické vlastnosti. Dle těchto vlastností je možné předpokládat reakci v různých situacích a prostředích, což je výhodné zejména v případě, kdy chceme znát chování materiálu v průběhu jeho života.

Mezi základní vlastnosti dielektrických materiálů patří vodivost, polarizace, permitivita, měrný elektrický odpor, dielektrické ztráty, elektrická pevnost, tepelné vlastnosti, viskozita a vlhkost. Nejdůležitější z vlastností jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

### 3.1 Komplexní permitivita

Jedná se o komplexní veličinu značenou jako  $\epsilon^*$  skládající se z reálné složky  $\epsilon'$  a imaginární složky  $\epsilon''$ . Reálná složka  $\epsilon'$  zobrazuje míru kapacitního charakteru a je závislá na kmitočtu, zatímco imaginární složka  $\epsilon''$  je úměrná dielektrickým ztrátám.

Imaginární složku  $\epsilon''$ , neboli ztrátové číslo, lze popsat vztahem:

$$\epsilon'' = \epsilon' * tg\delta \quad (3.1)$$

kde  $tg\delta$  je ztrátový činitel.

Komplexní permitivitu popisuje vztah:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \quad (3.2)$$

Další možností je popis komplexní permitivity dle Debyeho, kdy se uvažuje pouze jedna relaxační doba  $\tau$ :

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (3.3)$$

kde  $\epsilon_\infty$  je optická relativní permitivita při frekvenci blízké nekonečnu,  $\epsilon_s$  je statická relativní permitivita při frekvenci blízké 0,  $\omega$  je úhlový kmitočet a  $\tau$  je relaxační doba.

Po úpravě a rozdělení Debeyovy rovnice se získají vzorce pro jednotlivé složky komplexní permitivity. Rovnice pro výpočet reálné složky poté vypadá takto:

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3.4)$$

a rovnice pro výpočet imaginární složky je následující:

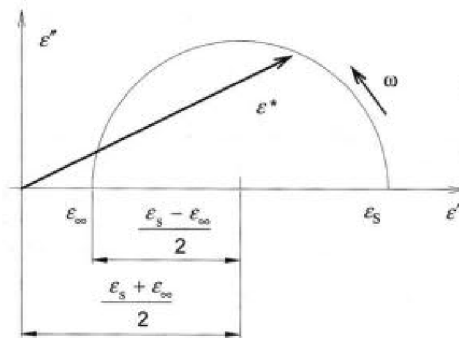
$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3.5)$$

Po rozšíření Debyovy rovnice dle Coleho a Coleho vzniká rovnice:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha}} \quad (3.6)$$

kde  $\alpha$  je distribuční parametr nabývající hodnot 0 až 1 nezávislý na frekvenci a udává šířku distribuce relaxačních dob,  $\tau_1$  je nejvíce pravděpodobná relaxační doba v jejímž okolí jsou relaxační doby rozděleny dle distribuční funkce  $y(\tau)$ .

Graficky je závislost komplexní permitivity popsána pomocí Cole-Cole diagramu, jehož ideální tvar je zobrazený na obr. 5. Čím větší hodnoty nabude parametr  $\alpha$ , tím více dojde v tomto diagramu k posunutí středu kružnice pod osu reálné složky komplexní permitivity  $\varepsilon'$ . [7] [8] [9] [10]

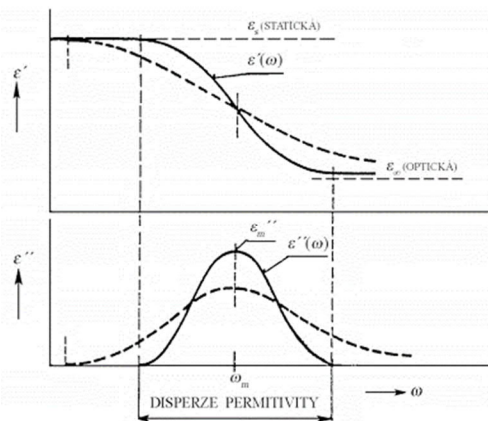


Obr. 5: Ideální tvar Cole-Cole diagramu [7]

Tento diagram však platí pouze pro malý počet dielektrik a v reálné situaci u dielektrických materiálů není křivka zcela symetrická. Disperzní křivky dielektrických materiálů vykazují méně strmý průběh a maxima nabývají nižších hodnot, což je zobrazeno na obr. 6. Pro případ materiálů se složitou vnitřní strukturou, mezi které patří také polymery, sestavili Negami a Havriliak následující vztah:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha}]^\beta} \quad (3.7)$$

kde  $\beta$  zobrazuje parametr nabývající hodnot 0 až 1 popisující asymetrii disperzní křivky. [7] [8] [9] [10]



Obr. 6: Vliv koeficientu distribuce na grafické závislosti Debyeho funkcí [10]

### 3.1.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita  $\varepsilon'$  je bezrozměrná fyzikální veličina udávající úměrnost mezi vektorem elektrické indukce a vektorem intenzity elektrického pole.

Pro relativní permitivitu  $\varepsilon'$  platí vzorec:

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0} \quad (3.8)$$

kde  $C_0$  je geometrická kapacita reprezentující kapacitu shodně uspořádaných elektrod ve vakuu, kterou lze vypočítat z rozměrů kondenzátoru a  $C_x$  je měřením určená kapacita kondenzátoru, kde je mezielektrodový prostor vyplněn měřeným materiálem. [7] [8] [9] [10]

Velikost relativní permitivity je závislá na fyzikálních podmínkách, druhu dielektrika a v případě zapojení do střídavého obvodu taky na kmitočtu. Pro vakuum je hodnota  $\varepsilon'=1$ , jelikož ve vakuu nemůže dojít k polarizaci a pro elektroizolační materiály nabývají hodnoty  $\varepsilon' > 1$ . [11]

## 3.2 Dielektrická polarizace

Dielektrická polarizace je fyzikální jev, při němž vlivem působením vnějšího i vnitřního elektrického pole dochází k přemísťování vázaných nábojů v dielektrickém materiálu ze svých rovnovážných poloh do nových na malé vzdálenosti a v případě látky s dipólovými molekulami dochází pouze k orientaci ve směru pole. [8]

Při vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole s konstantní intenzitou  $\vec{E}$  dojde ke zvýšení elektrické indukce  $\vec{D}$  vlivem polarizačních jevů. Hodnota elektrické indukce  $\vec{D}$  se zvětší o hodnotu vektoru polarizace  $\vec{P}$  ve srovnání s indukcí ve vakuu  $\vec{D}_0$  dle vztahu:

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} \quad (3.9)$$

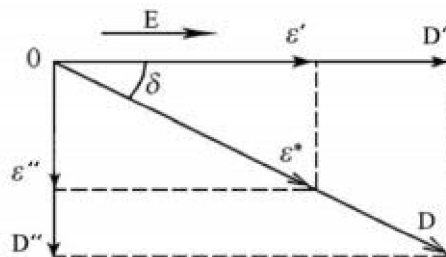
Vztah popisující souvislost elektrického pole  $\vec{E}$  a elektrickou indukcí  $\vec{D}$  je dán jako:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon' * \vec{E} \quad (3.10)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua rovna hodnotě  $8,854 * 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ . [7] [8] [9] [11]

V případě polarizace střídavým elektrickým polem je elektrická indukce v porovnání s intenzitou elektrického pole zpožděná, což je zobrazeno na obr. 7 a platí rovnice:

$$\widehat{D}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon'(\omega) * \widehat{E}(\omega) \quad (3.11)$$



Obr. 7: Vektorový diagram komplexní permitivity a elektrické indukce [11]

### 3.3 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty představují celkový souhrn energie rozptýlené v objemu dielektrika za jednotku času po jeho vložení do elektrického pole. V ideálním dielektriku nedochází k dielektrickým ztrátám, avšak v případě reálného dielektrika skládajícího se z atomů, molekul a iontů ztráty vykazuje. [10]

Z fyzikálního pohledu můžeme dielektrické ztráty rozdělit na polarizační, ionizační a vodivostní. Polarizační ztráty jsou důsledkem polarizačních pochodů a jsou způsobeny polarizacemi iontovými-relaxačními a dipólovými. Vodivostní ztráty se vyskytují u všech dielektrik, zatímco ionizační ztráty pozorujeme pouze v případě plynů a tuhých a pevných látek s vměstkou obsahující plyn. Veškeré ztráty se projevují ohřátím dielektrika a jejich míru popisuje ztrátový činitel  $tg\delta$ . [10]

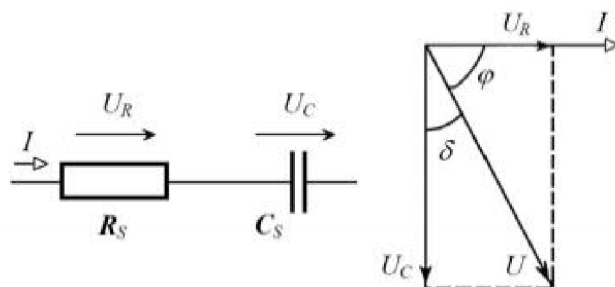
#### 3.3.1 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je bezrozměrná veličina závislá na frekvenci a teplotě a slouží ke stanovení kvality izolačního systému a určení možných změn proběhlých v dielektrickém materiálu. Ztrátový činitel je tedy tangenta ztrátového úhlu při daném napětí, teplotě a kmitočtu.

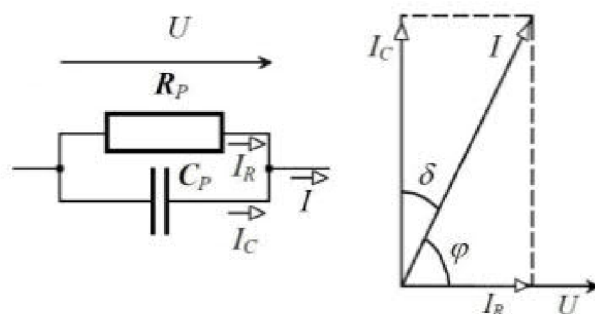
Ztráty proběhlé v izolaci daného systému se charakterizují pomocí sériového a paralelního náhradního obvodu, které jsou zobrazeny na obr. 8 a obr. 9. Velikost ztrátového činitele lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$tg\delta = \omega C_S R_S = \frac{1}{\omega C_P R_P} \quad (3.12)$$

kde odpory  $R_S$  a  $R_P$  popisují ztrátové složky materiálu a kapacity  $C_S$  a  $C_P$  naopak kapacitu izolace bez ztrát. Sériová kapacita  $C_S$  se sériovým odporem  $R_S$  charakterizují sériové náhradní obvod a paralelní náhradní obvod poté zastupuje paralelně zapojená kapacita  $C_P$  s paralelně zapojeným odporem  $R_P$ . [10] [11]



Obr. 8: Sériové náhradní zapojení s fázorovým diagramem [11]



Obr. 9: Paralelní náhradní zapojení s fázorovým diagramem [11]

### 3.4 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je důležitou veličinou pro elektrotechnické materiály a materiálové soustavy v technické praxi. Jde o fyzikální pojem popisující schopnost materiálů odolat elektrickému poli.

Elektrické pole způsobuje polarizaci dielektrika a při zvětšení intenzity elektrického pole se zvětšuje koncentrace volných nábojů i jejich pohyblivost. V případě zvyšování intenzity elektrického pole dojde k tzv. průrazu dielektrika. Dielektrikum ztratí své elektroizolační vlastnosti a vytvoří se v něm vodivý kanálek, jímž mohou procházet značné proudy. Průraz dielektrika označuje výboj vzniklý v pevných materiálech. V takovýchto materiálech způsobí průraz nevratné změny struktury. U plynů a kapalin nemluvíme o průrazu, avšak o přeskoku. Elektroizolační vlastnosti se odezněním přeskoku obnoví.

Elektrická pevnost v homogenním elektrickém poli je popsána vztahem

$$E_p = \frac{U_p}{h} \quad (3.13)$$

kde  $U_p$  je velikost průrazného napětí a  $h$  je hodnota tloušťky izolantu v místě průrazu nebo přeskoku. Základní jednotkou elektrické pevnosti je V/m.

Průrazné napětí je nejnižší hodnota napětí, při kterém dojde k elektrickému průrazu dielektrika, čímž látka ztratí své izolační schopnosti. Velikost tohoto napětí závisí na rychlosti růstu napětí na elektrodách a také na vzájemném uspořádání izolátoru a elektrod, na které je přiloženo elektrické pole. [12]

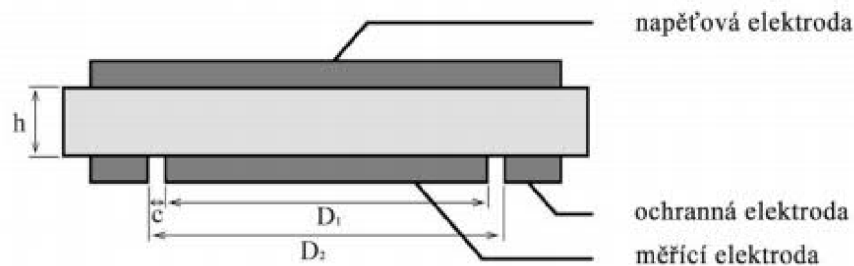


Teoretická hodnota elektrické pevnosti v ideálním dielektriku nikdy nebude rovna reálné hodnotě, jelikož dielektrikum vždy obsahuje drobné defekty, které pevnost snižují. Elektrická pevnost je ovlivněna nejen tloušťkou izolantu, ale také teplotou, homogenitou či nehomogenitou elektrického pole, druhem elektrického pole, kmitočty, dobou působení pole a rychlostí zvyšování napětí při zkoušce. Např. čím menší napětí působí na izolant, tím větší časový úsek uplyne do momentu průrazu.

S cílem zvýšení elektrické pevnosti se při výrobě přístrojových transformátorů používají vícenásobné tenké vrstvy dielektrik, jelikož elektrická pevnost tenkých vrstev materiálu je vyšší než při použití silnějších vrstev.

### 3.5 Rezistivita

Rezistivita neboli měrný elektrický odpor je fyzikální veličinou závislou na teplotě popisující diferenciální či odporové vlastnosti takových látek, které vedou elektrický proud. Pro určování rezistivity existuje několik způsobů uspořádání, systémy mohou být válcové, nebo rovinné se dvěma nebo třemi elektrodami, jeden ze způsobů je znázorněn na obr. 10. [13]



Obr. 10: Schématické uspořádání tříelektrodového systému [14]

#### 3.5.1 Povrchová rezistivita

Povrchová rezistivita neboli měrný elektrický odpor, je dán poměrem proudové hustoty povrchu materiálu a intenzity stejnosměrného elektrického pole dle vzorce:

$$\rho_p = R_p \frac{\pi(B * c + D_1)}{c} \quad (3.14)$$

kde  $R_p$  udává povrchový odpor,  $B$  je součinitel elektrodového systému,  $c$  popisuje vzdálenost mezi ochrannou a měřicí elektrodou a  $D_1$  je průměr měřicí elektrody. [11] [13]

#### 3.5.2 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita neboli měrný vnitřní odpor, je dán poměrem proudové hustoty vně materiálu a intenzity stejnosměrného elektrického pole dle vzorce:

$$\rho_v = R_v \frac{\pi(B * c + D_1)^2}{4h} \quad (3.15)$$

kde  $R_v$  udává vnitřní odpor a  $h$  je tloušťka měřeného materiálu. [11] [13]

### 3.6 Elastická deformace

Také elastická deformace patří mezi jednu z důležitých veličin. Její hodnota se určuje pomocí Hookeova zákona, který dává do úměrnosti plochu, elastické napětí a deformaci daného tělesa.

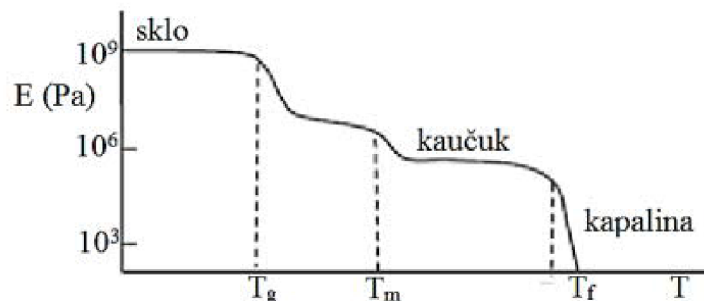
Hookeův zákon pro izotropní látky je definován dle vzorců:

$$S = s * T \quad (3.16)$$

$$T = c * S \quad (3.17)$$

$$T = \frac{F}{A} \quad (3.18)$$

kde  $S$  je elastická deformace tělesa přímo úměrná působícímu elastickému napětí  $T$ , které je určeno jako jednotková plocha  $A$  na niž působí síla  $F$ . Dále  $c$  reprezentuje elastický modul a  $s$  elastický koeficient. Výsledkem přímé úměrnosti mezi poměrnou deformací a elastickým napětím je Youngův modul neboli modul pružnosti, který popisuje tvarovou stálost polymerů. Příklad pro reálný, tedy semikrystalický, polymer zobrazen na obr. 11. [15] [16]



Obr. 11: Závislost modulu pružnosti na teplotě u částečně krystalického polymeru ( $T_g$  – teplota skelného přechodu,  $T_m$  – teplota tání,  $T_f$  – teplota tečení) [17]

### 3.7 Vlhkost

Vlhkost je současně s teplotou hlavní degradační činitel elektroizolačních materiálů. Jejich současné působení může změnit vlastnosti použitých materiálů a následně funkci elektrotechnických zařízení. Konstantní působení teploty a vlhkosti má sice velký dopad na vlastnosti materiálu, avšak větší následky má časté střídání těchto vlivů, jelikož má poté látka schopnost větší absorpce vody, což může vést až k porušení její struktury. Pro zvyšování kvality elektrotechnických zařízení se ke snížení kondenzace na povrchu látky používají např. silikonové kaučuky, či teflon. [18]

### 3.7.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost je základní vlastností okolního prostředí, které má velký vliv na navlhavost látek a udává množství vodní páry obsažené v určitém množství suchého vzduchu. Pro určení množství této páry jsou potřebné charakteristiky rosného bodu a měrné, absolutní a relativní vlhkosti vzduchu.

**Absolutní vlhkost vzduchu** je hustota vodní páry, která je značně závislá na teplotě a je definována jako hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu.

**Rosný bod** je teplota, kdy relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %. Kondenzace nastává v momentě, kdy teplota klesne pod tento bod a je možné ji urychlit přítomností kondenzačních jader. Pro různé absolutní vlhkosti je teplota rosného bodu odlišná, s větším množstvím vodní páry ve vzduchu roste i teplota rosného bodu. Za dané teploty může vzduch obsahovat jen dané množství vlhkosti. Pojem rosný bod je v podstatě jen jiné vyjádření absolutní vlhkosti. [19]

**Relativní (poměrná) vlhkost vzduchu** udává míru nasycení páry, tzn. poměr skutečné k maximální absolutní vlhkosti vzduchu při totožné teplotě při stejných podmínkách (teplotě a tlaku). Klasifikace vlhkosti vzduchu dle procentuálního podílu relativní vlhkosti vzduchu je v tab. 1.

Tab. 1: Rozdělení vlhkosti vzduchu

Úroveň vlhkosti vzduchu	Hodnota relativní vlhkosti vzduchu
Suchý vzduch	<50 %
Normální vlhký vzduch	70–80 %
Vlhký vzduch	> 90 %

**Zvyšování vlhkosti vzduchu** – možno docílit vlivem roztoků solí nebo kyselin.

**Snižování vlhkosti vzduchu** – využití tuhých i kapalných hydroskopických látek, např. silikagelu či aktivovaného oxidu hlinitého, které pohlcují vlhkost ze vzduchu až do stavu hydroskopické rovnováhy. [20]

Pro odvlhčování vzduchu existuje několik možných metod – pohlcování vody absorpčními látkami nebo přimícháváním sušícího vzduchu a ochlazení pod mez kondenzace, které je založeno na principu, kdy vlhký vzduch přichází do kontaktu s chladicí plochou o nižší teplotě než teplota rosného bodu. Důsledkem toho na této plošce z kondenzuje určité množství vodních par, čímž se sníží jejich obsah ve vzduchu.

**Existuje několik možných způsobů odvlhčování:**

**Odvlhčování teplým vzduchem** – využití změny stavu vzduchu, kdy při větší teplotě dokáže pohltnout větší množství vlhkosti. Při použití této metody musí být zajištěna kvalitní výměna zahřátého vzduchu. Tento způsob je však nákladný z důvodu použitého velkého topného výkonu. [21]

**Odvlhčování kondenzací** – ochlazením ovhčeného vzduchu pod teplotu rosného bodu a následným zahřátím se vlhkosti zbavíme vlivem kapalně přeměny neboli kondenzace. Tento způsob je ve srovnání s odvlhčováním teplým vzduchem účinnější a energeticky úspornější.

**Odvlhčování absorpcí** – pohlcování vzdušné vlhkosti díky schopnosti hydroskopického materiálu, např. silikagelu.

## 3.8 Absorpce vlhkosti

Dle schopnosti materiálu pohlcovat vlhkost z okolí dělíme látky na hydroskopické a nehydroskopické.

Nehydroskopický materiál je charakteristický tím, že při libovolné vlhkosti vzduchu má vlhkost materiálu tlak nasycené páry. Za předpokladu, že sušící vzduch není vodní parou nasycen, lze z takového materiálu vlhkost zcela odstranit.

V hydroskopickém materiálu závisí obsah vlhkosti na vlhkosti (buňky pohlcováním vlhkosti mění svůj rozměr) a teplotě okolního prostředí. Sušení takových materiálů je složité. Aby nedošlo k jejich znehodnocení v průběhu skladování, musí se uchovávat v dobře uzavřených nádobách v suchém prostředí (nejlépe v exsikátoru). [19]

### 3.8.1 Navlhavost

Navlhavost neboli hydroskopičnost je schopnost materiálu přijímat vlhkost z okolního prostředí, kdy základním dějem je adsorpce usazených molekul vody z povrchu látky.

Než se molekula vody desorbuje, zůstává na povrchu látky po dobu, která je silně závislá na teplotě a vazební energii. Navlhavost je definována přírůstkem hmotnosti vody obsažené v jednotce objemu látky při působení prostředí se 100 % relativní vlhkostí. Navlhnuté izolační materiály mají výrazný vliv na celkové elektrické vlastnosti, jako je ztrátový činitel, elektrická pevnost či elektrický odpor. Není však důležité pouze množství pohlcených molekul vody, ale i druh použitého izolačního materiálu. [20] [22]

### 3.8.2 Vliv vlhkosti na vlastnosti epoxidových pryskyřic

Absorbovaná voda v epoxidových pryskyřicích má výrazný vliv na jejich elektrické vlastnosti, zejména však na hodnoty vnitřní rezistivity.

Se zvyšujícím se množstvím obsažené vody vnitřní rezistivita klesá až o 7 řádů. Rychlost difúze vody do látky je závislá na čase, aktivační energii a teplotě a hustota difúzního toku je úměrná gradientu koncentrace, což popisuje Fickův zákon:

$$j = -D * gradc \quad (3.19)$$

kde  $j$  je hustota difúzního toku,  $D$  je označení pro difúzní koeficient a  $gradc$  je gradient koncentrace. [23]

## 3.9 Tepelné vlastnosti

Zvýšením teploty může dojít k několika chemickým reakcím makromolekul, které mohou při vysokých teplotách způsobit změnu struktury dané látky.

Mezi zmíněné chemické reakce patří například síťování, cyklizační reakce, štěpení řetězců nebo oxidační reakce. Tepelný pohyb makromolekul je závislý na typu polymeru, tedy zda je polymer v amorfní, krystalické, nebo semikrystalické fázi.

### 3.9.1 Vliv teploty na vlastnosti epoxidových pryskyřic

Zvyšující se teplota také souvisí s degradačními vlivy, jelikož některé druhy elektrických degradací, např. elektrické stromečky, jsou závislé na teplotě.

Pro odhalení případných degradačních procesů způsobených nejen teplotními vlivy slouží dielektrická spektroskopie. Touto metodou je možné definovat dielektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic sledováním molekulární dynamiky daných materiálů. Speciální vlastnost této metody je rozsah frekvencí od  $10^{-5}$  Hz do  $10^{11}$  Hz, který umožňuje pozorovat odezvy rychlých i pomalých molekulárních pochodů, jelikož při těchto hodnotách kmitočtu polymery reagují na přiložené elektrické pole. [24]

## 4 DIAGNOSTICKÉ METODY

K určování elektrických materiálových veličin u polymerů existuje celá řada metod, z nichž mezi nejpoužívanější pro měření rezistivity patří Wheatstonův můstek a Voltampérová metoda a pro měření ztrátového činitele a relativní permitivity se používají metody se Scheringovým můstkem, transformátorovým můstkem a měření na Q-metru. Dále je pro stanovování dielektrických vlastností důležitá i metoda impedanční spektroskopie. Detailněji jsou vybrané metody popsány v následujících podkapitolách.

### 4.1 Impedanční spektroskopie

Impedanční spektroskopie, zkráceně IS, se využívá k určování elektrických a dielektrických vlastností daného materiálu za použití impedančních spekter. Frekvenční závislosti zdánlivého elektrického odpor se určují z naměřených závislostí střídavého proudu na napětí. Z těchto hodnot lze následně určit ekvivalentní obvody. [25]

Ekvivalentní obvody interpretují naměřené frekvenční závislosti pomocí základních prvků jako jsou rezistor, kondenzátor a cívka. Pro systémy obsahující elektrolyty se používají další členy (tangenciální, konstantního posunu) a impedance (Warburgova, Gerisherova). [26]

Každý prvek je popsán vztahem pro výpočet impedance daného prvku. Pro rezistor  $R$  je vztah následující:

$$Z_R = R \quad (4.1)$$

pro výpočet impedance kondenzátoru  $C$  platí

$$Z_C = \frac{-i}{\omega C} \quad (4.2)$$

a pro hodnotu impedance cívky  $L$

$$Z_L = i\omega L \quad (4.3)$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet roven dvojnásobnému součinu frekvence  $f$  a Ludolfova čísla  $\pi$ . [26]

Ke zkoumání mezifázových elektrických vlastností materiálů s převládající iontovou vodivostí, mezi které patří například pevné a kapalné elektrolyty slouží elektrochemická impedanční spektroskopie, zkráceně EIS. Jejíž princip spočívá ve studování odezvy elektrody na vložený signál s malou amplitudou a proměnném kmitočtu. [27]

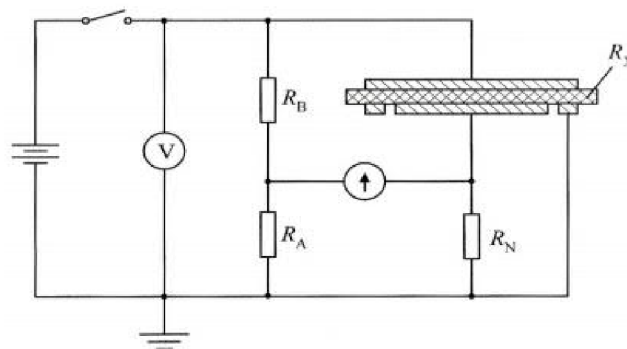
## 4.2 Metoda Wheatstonova můstku

Jde o metodu používanou pro měření rezistivity vzorků a spočívá ve srovnávání známého referenčního odporu o velké hodnotě s hodnotou neznámého odporu z čehož vyplývá, že jde o metodu porovnávací. [7]

Základní měření schématické zapojení pro určení vnitřního odporu je zobrazeno na obr. 12, kde jsou na větvích Wheatstonova můstku zapojeny čtyři odpory, kde jeden reprezentuje měřený vzorek  $R_x$  a zbývající tři jsou vzorky se známou hodnotou odporu, z nichž odpor  $R_A$  slouží pro jemné vyrovnání, odpor  $R_B$  pro dekádové změny a odpor  $R_N$  je neměnný. Jako stejnosměrný zesilovač slouží nulový indikátor. [28]

Hledaný odpor  $R_x$  se vypočte dle následujícího vztahu:

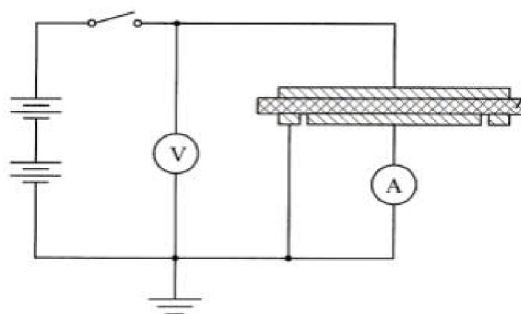
$$R_x = R_N * \frac{R_B}{R_A} \quad (4.4)$$



Obr. 12: Schéma zapojení při metodě Wheatstonova můstku při měření vnitřního odporu [7]

## 4.3 Voltampérová metoda

Metoda používaná zejména pro určení hodnot vnitřní a povrchové rezistivity spočívající v měření vzorku zapojeného v tříelektrodevém systému pomocí pikoampérmetru. Základní schématické zapojení je znázorněno na obr. 13.



Obr. 13: Schématické zapojení voltampérové metody při měření vnitřního odporu [7]

Princip měření spočívá v určení hodnot napětí a proudu, z nichž se vypočte pomocí Ohmova zákona hodnota vnitřního odporu  $R_V$  a následně se dopočítá hodnota vnitřní rezistivity  $\rho_V$  dle následujících vzorců:

$$R_V = \frac{U}{I} \quad (4.5)$$

$$\rho_V = R_V * \frac{S_{ef}}{h} \quad (4.6)$$

kde  $S_{ef}$  reprezentuje elektivní plochu měřicí elektrody a  $h$  udává tloušťku měřeného vzorku. [7] [28]

#### 4.4 Měření se Scheringovým můstkem

Metoda měření Scheringovým můstkem se používá výhradně na kmitočtové úrovni 50 Hz a slouží k určení velikosti ztrátového činitele a hodnot reálné složky komplexní permitivity.

Velikost ztrátového činitele se určuje ze vzorce:

$$tg\delta = \omega C_1 R_1 \quad (4.7)$$

a hodnotu komplexní permitivity ze vztahu:

$$\varepsilon^* = \frac{C_S}{C_0} \quad (4.8)$$

kde  $C_S$  je sériově zapojený kondenzátor určený vztahem:

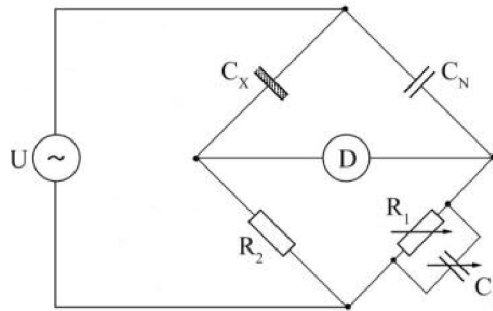
$$C_S = C_N * \frac{R_1}{R_2} \quad (4.9)$$

a  $C_0$  reprezentuje geometrickou kapacitu tříelektrodevého systému danou dle rovnice:

$$C_0 = \varepsilon_0 * \frac{\pi(B * c + d)^2}{4h} \quad (4.10)$$

kde  $B$  je součinitel elektrodevého systému,  $c$  popisuje vzdálenost mezi ochrannou a měřicí elektrodou a  $d$  je průměr měřicí elektrody. [11] [29]





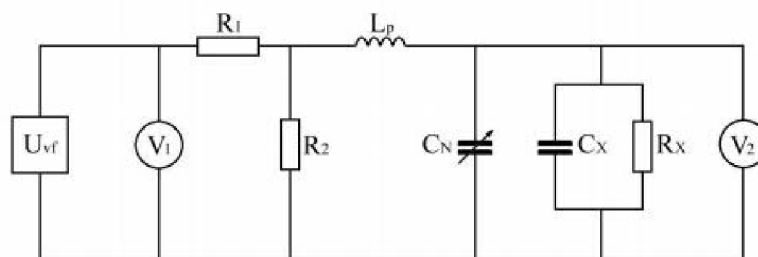
Obr. 14: Schématické zapojení Scheringova můstku [29]

Schématické zapojení Scheringova můstku je znázorněn na obr. 14. Tento obvod obsahuje dvě měřicí větve s odpory  $R_1$  a  $R_2$  a dvě kapacitní větve, které obsahují kapacity  $C_V$  a  $C_N$ . V případě kapacity  $C_N$  jde o normálový kondenzátor a kapacita  $C_V$  reprezentuje měřený vzorek, který se nahrazuje v sérii zapojeným rezistorem  $R_S$  a kondenzátorem  $C_S$ . Kondenzátor  $C_1$  s rezistory  $R_1$  a  $R_2$  plní pouze vyvažovací funkci. Nejvyskytovanější využití je zapojení s tříelektrodovým systémem, přičemž třetí elektroda je ochranná a slouží k omezení vlivu parazitní kapacity. [29]

## 4.5 Měření pomocí Q-metru

Metoda pro měření ztrátového činitele a permitivity pomocí Q-metru náleží mezi substituční rezonanční metody ve frekvenčním rozmezí 10 kHz až 260 MHz.

Princip metody je realizován na svorkách obvodu a spočívá s přímém měření napětí. Jedno ze základních zapojení pro měření permitivity a ztrátového činitele je naznačeno na obr. 15, kde měřený vzorek reprezentují paralelně zapojený ztrátový rezistor  $R_X$  s kondenzátorem  $C_X$ . Hodnoty relativní permitivity se určí z dvojího měření činitele jakosti obvodu  $Q$ , přičemž první měření probíhá po vložení vzorku mezi elektrody a druhé po vyjmutí tohoto vzorku.



Obr. 15: Schématické zapojení Q-metru s dvuelektrodovým mikrometrickým kondenzátorem jako měřicím přípravkem [11]

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je u předložených vzorků stanovit hodnoty vnitřního odporu v závislosti na teplotě v rozmezí 20 až 125 °C a relativní permitivity a ztrátového činitele v závislosti na kmitočtu a teplotě v témže rozmezí a zhodnotit dosažené výsledky s výsledky očekávanými. Vzorky jsou vytvrzené epoxidové licí směsí v 7 různých provedeních s rozdílnými druhy použitého flexibilizátoru.

### 5.1 Příprava vzorků

Vzorky určené pro měření experimentální části byly pěti druhů vytvrzené epoxidové licí směsí s rozdílným množstvím a druhem použitého flexibilizátoru. Přesné složky a poměry není možné uvést z důvodu organizačního know-how firem SYNPO a.s. a ABB s.r.o. Vzorky byly předloženy po 9-10 ks odlitků od každého druhu o rozměrech 9,9 x 9,9 cm v případě čtvercových vzorků a kruhové vzorky o průměru 3,6 cm. Tloušťka se u obou druhů vzorků pohybovala okolo hranice 2 mm. Vzorky byly odlity a nařezány firmou SYNPO a.s.

U všech předložených vzorků byla v 9 různých částech odlitku změřena tloušťka pomocí mikrometru digi Schut. Ze získaných hodnot zaznamenaných v přílohách 1 a 2 bylo od každého druhu vzorků určeno 5 odlitků s největší rovinností pomocí hodnot výběrových směrodatných odchylek dle vzorce:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

přičemž  $N$  je počet měření,  $x_i$  je změřená hodnota a  $\bar{x}$  je aritmetický průměr změřených hodnot. Dále byly z naměřených hodnot stanoveny průměrné hodnoty tlouštěk potřebné pro nastavení impedančního analyzátoru Tettex 2830/2831.

Vzhledem k fyzikálním a chemickým vlastnostem byly vybrané odlitky za cílem jejich vysušení umístěny do horkovzdušného sterilizátoru BMT Stericell 111 po dobu 3 dní při teplotě 90°C. Po vyjmutí byly odlitky umístěny do exsikátoru pro zabránění opětovnému navlhnutí. Tímto způsobem připravené vzorky je možné měřit, v případě měření nevysušených vzorků by v nich obsažená vlhkost mohla mít za výsledek zkreslení měření daných veličin.

### 5.2 Realizovaná měření a jejich vyhodnocení

Předmětem diplomové práce bylo stanovení hodnot relativní permitivity a ztrátového činitele v závislosti na teplotě v rozsahu teplot 25 až 120 °C a měření závislosti vnitřního odporu na teplotě a kmitočtu v témže rozsahu teplot pro 7 různých druhů vytvrzených epoxidových licích směsí s odlišným typem flexibilizátoru.

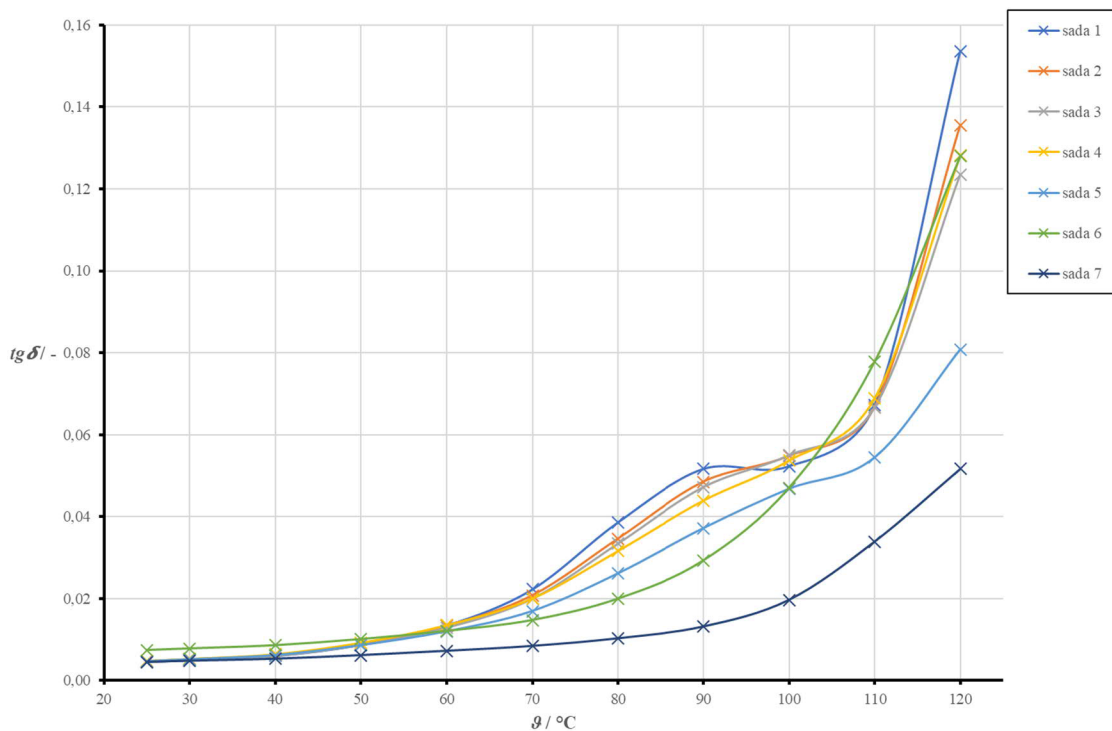
První část měření zahrnovala opakované měření relativní permitivity a ztrátového činitele na impedančním analyzátoru Tettex 2830/2831 s připojeným měřicím přípravkem pro pevné dielektrické materiály Tettex 2914. Měření probíhalo při konstantní hodnotě kmitočtu 50 Hz, tlaku 5 N/cm<sup>2</sup> a napětí 500 V v rozsahu teplot 25 °C až 120 °C s krokem 10 °C. Pro ustálení teploty byl zvolen časový interval mezi jednotlivými kroky na 30 minut. Při každé teplotě byly změřeny 3 hodnoty pro 9 až 10 různých odlitků stejného materiálu. Tato data byla následně zprůměrována, čímž byly získány výsledné hodnoty pro každý vzorek a teplotu. Měření probíhalo dle normy ČSN IEC 250.

Získaná data pro ztrátový činitel  $tg\delta$  jsou zaznamenána v tab. 2 a z ní vynesené grafické závislosti na obr. 16. Z této grafické závislosti je znatelné, že se zvyšující se teplotou roste také ztrátový činitel  $tg\delta$ . Počáteční hodnoty při pokojové teplotě jsou u všech vzorků stejné s rozdílem  $\pm 0,0001$  vyjma sady 6. Koncové hodnoty při zatížení 120 °C jsou pro různé sady rozdíly až jednu desetinu, konkrétně jsou výsledky v rozsahu 0,05 až 0,15. Zlomové části grafické závislosti nastává po dosažení teploty 60 °C, kdy hodnoty začínají stoupat a při 100 °C, kdy průběhy vykazují prudký nárůst. Z tohoto grafu je taktéž zřetelné, že nejnižší hodnoty ztrátového činitele byly naměřeny pro vzorky ze sady 7 a také porovnání s ostatními vzorky vykazuje tato sada nejméně strmý průběh, což platí i pro sadu 5. Naopak nejvyšší hodnoty ztrátového činitele se vyskytovaly u vzorků náležící sadě 1.

Údaje pro relativní permitivitu  $\epsilon'$  jsou v tab. 3 a příslušná grafická závislost na obr. 17 z níž je patrné, že se zvyšující se teplotou rostou i hodnoty relativní permitivity. Při pokojové teplotě je rozdíl mezi jednotlivými sadami nejvýše 0,2, zatímco při nejvyšších hodnotách teplot se hodnota relativní permitivity pro sady s nejnižší a nejvyšší hodnotou rozdíl liší 0,9. Nejstrmější průběh vykazují vzorky v rozmezí teplot 70 °C až 110 °C, avšak při vyšších teplotách již průběhy nevykazují rapidní zvýšení a u některých vzorků dochází spíše k ustálení. Nejnižších hodnot nabývají opět vzorky ze sady 7 a její průběh je společně se sadou 6 nejlineárnější v porovnání s ostatními. Nejvyšších hodnot relativní permitivity nabývají vzorky ze sady 1.

Tab. 2: Průměrné hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] pro různé teploty a sady vzorků

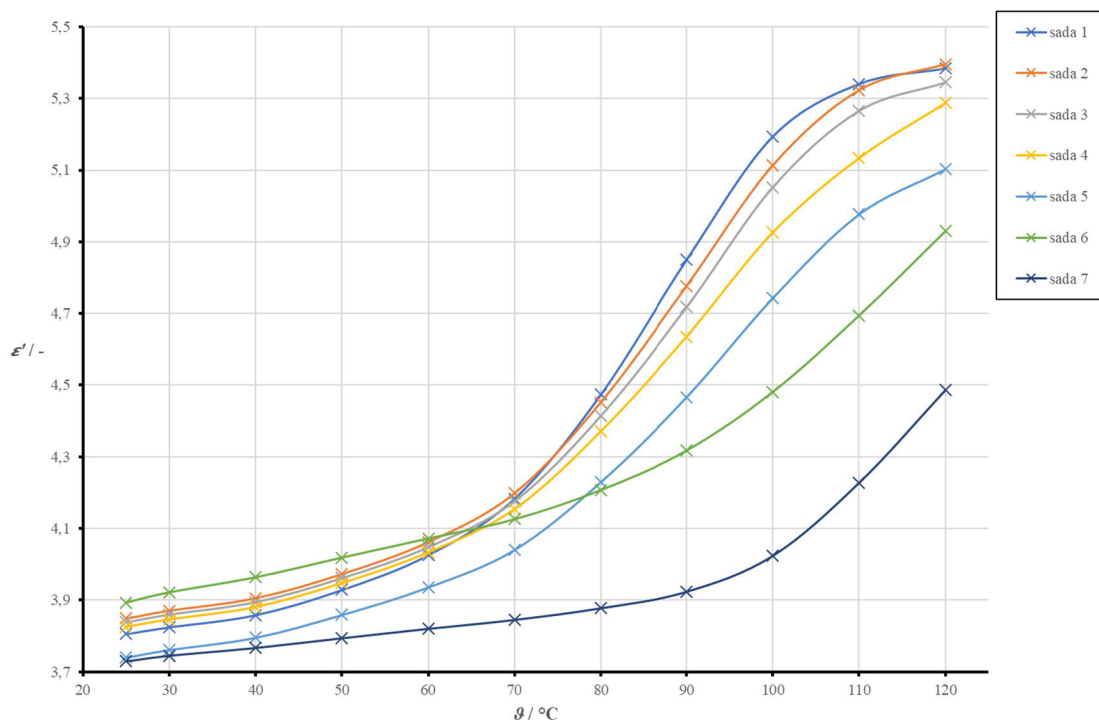
$\theta$ [°C]	sada 1	sada 2	sada 3	sada 4	sada 5	sada 6	sada 7
25	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,007	0,004
30	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,008	0,005
40	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,009	0,005
50	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,006
60	0,013	0,013	0,013	0,013	0,012	0,012	0,007
70	0,022	0,021	0,020	0,020	0,017	0,015	0,008
80	0,039	0,035	0,033	0,032	0,026	0,020	0,010
90	0,052	0,048	0,047	0,044	0,037	0,029	0,013
100	0,052	0,055	0,055	0,054	0,047	0,047	0,020
110	0,067	0,067	0,067	0,069	0,054	0,078	0,034
120	0,154	0,136	0,124	0,128	0,081	0,128	0,052



Obr. 16: Vynesené teplotní závislosti ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé sady vzorků

Tab. 3: Průměrné hodnoty relativní permitivity  $\epsilon'$  [-] pro různé teploty a sady vzorků

$\theta$ [°C]	sada 1	sada 2	sada 3	sada 4	sada 5	sada 6	sada 7
<b>25</b>	3,806	3,848	3,839	3,825	3,740	3,893	3,729
<b>30</b>	3,824	3,871	3,860	3,846	3,761	3,922	3,745
<b>40</b>	3,858	3,905	3,895	3,881	3,795	3,964	3,767
<b>50</b>	3,929	3,973	3,962	3,948	3,859	4,019	3,794
<b>60</b>	4,026	4,062	4,048	4,033	3,936	4,072	3,820
<b>70</b>	4,183	4,199	4,177	4,154	4,040	4,126	3,845
<b>80</b>	4,474	4,452	4,415	4,371	4,229	4,207	3,878
<b>90</b>	4,849	4,776	4,718	4,635	4,466	4,318	3,924
<b>100</b>	5,194	5,113	5,053	4,926	4,743	4,481	4,024
<b>110</b>	5,340	5,323	5,266	5,134	4,977	4,695	4,228
<b>120</b>	5,384	5,396	5,346	5,287	5,103	4,930	4,486

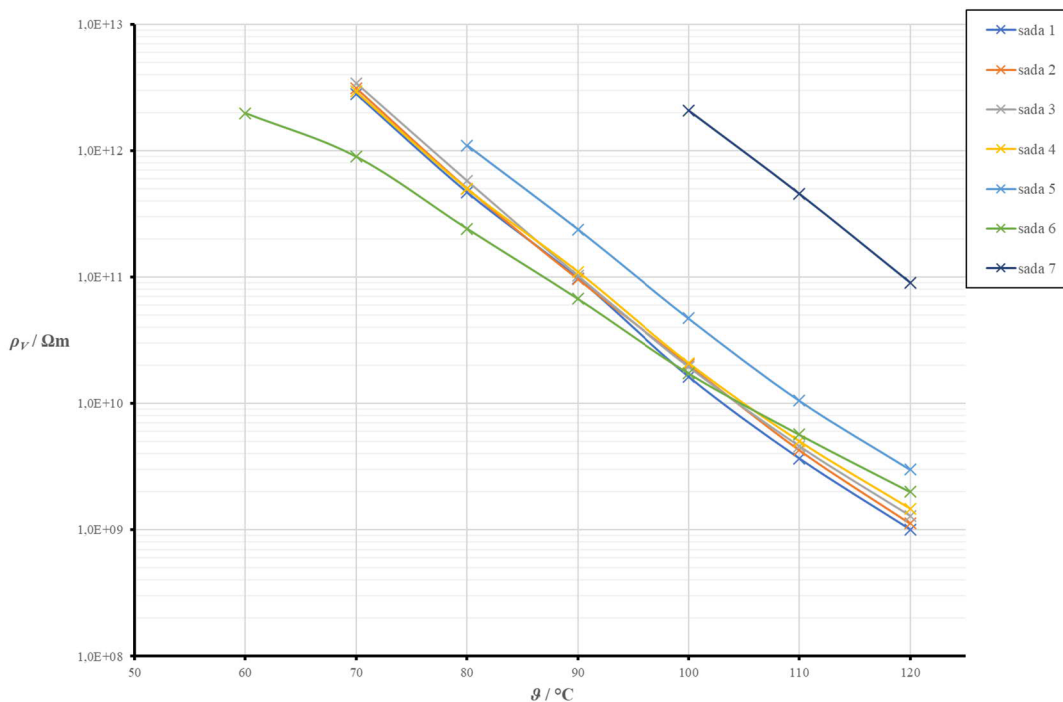


Obr. 17: Vynesené teplotní závislosti relativní permitivity  $\varepsilon'$  pro různé sady vzorků

Pro realizaci měření vnitřní rezistivity bylo použité stejné zapojení impedančního analyzátoru Tettex 2830/2831 s měřicím přípravkem Tettex 2914. Nastavení hodnot bylo stejné jako pro předchozí realizované měření, tj. konstantní přítlak 5 N/cm<sup>2</sup> a kmitočet 50 Hz, pouze hodnota stejnosměrného napětí byla zvýšena na 1,8 kV. Po ustálení zvolené teploty bylo potřeba nechat vzorek po dobu 1 minuty vybit. Získané hodnoty jsou zaznamenány v tab. 4 a vynesené v grafické závislosti na obr. 18. V tab. 4 je vidět, že pro většinu sad nejsou hodnoty do 60 °C zaznamenány, a to z toho důvodu, že rozsah zvoleného přístroje byl do 10<sup>12</sup> Ωm. Grafická závislosti zobrazuje pokles vnitřní rezistivity se zvyšující se teplotou, a to téměř se stejnou významností u všech sad vyjma sady 7, kde byla vnitřní rezistivita změřena až po dosažení teploty 110 °C.

Tab. 4: Naměřené hodnoty vnitřní rezistivity  $\rho_v$  [Ωm] pro různé teploty a sady vzorků

$\theta$ [°C]	sada 1	sada 2	sada 3	sada 4	sada 5	sada 6	sada 7
25	4,3E+13	3,5E+13	3,8E+13	2,9E+13	4,3E+13	1,8E+14	4,9E+13
30	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	2,0E+12	-
70	2,8E+12	3,1E+12	3,4E+12	2,9E+12	-	9,0E+11	-
80	4,7E+11	5,0E+11	5,8E+11	5,0E+11	1,1E+12	2,4E+11	-
90	9,8E+10	9,6E+10	1,0E+11	1,1E+11	2,4E+11	6,7E+10	-
100	1,6E+10	2,0E+10	2,0E+10	2,1E+10	4,7E+10	1,7E+10	2,1E+12
110	3,7E+09	4,3E+09	4,6E+09	5,0E+09	1,1E+10	5,7E+09	4,6E+11
120	1,0E+09	1,1E+09	1,3E+09	1,5E+09	3,0E+09	2,0E+09	9,0E+10



Obr. 18: Vynesené teplotní závislosti vnitřní rezistivity  $\rho_v$  pro různé sady vzorků

Vzhledem k tomu, že rozsah analyzátoru končí hodnotami  $10^{12} \Omega m$ , bylo dodatečně realizováno měření na přístroji Agilent 4339B Resistance meter v zapojení s Agilent 16008B Resistivity Cell, na kterém byly doměřeny hodnoty vnitřního i povrchového odporu při pokojové teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Měření probíhalo při nastaveném konstantním napětí  $U 1000 \text{ V}$  v čase  $t 60 \text{ s}$ . Hodnoty odporů bylo nutné přepočítat na rezistivity dle vzorců:

$$\rho_v = R_v * \frac{\pi(B * c + d_m)^2}{4h} \quad (5.2)$$

a

$$\rho_p = R_p * \frac{\pi(c + d_m)}{c} \quad (5.3)$$

kde  $h$  je tloušťka vzorku,  $c$  je šířka mezery, která byla stanovena na  $6 \text{ mm}$ ,  $B$  reprezentuje součinitele elektrodového systému, jenž je pro použitý systém roven  $0$  a  $d_m$  je průměr měřicí elektrody, který se v tomto případě rovná  $26 \text{ mm}$ . Veškeré zaznamenané i přepočtené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 5. Nejvyšší zaznamenaná vnitřní rezistivita byla u sady 7 a naopak nejnižší se vyskytovala u sady 6, což odpovídá i vyneseným grafickým závislostem z předchozího měření na obr. 18. Přepočtené hodnoty vnitřní rezistivity při pokojové teplotě byly doplněny do prvního řádku k hodnotám získaným z měření na Tettex do tab. 5. Nejvyšší povrchovou rezistivitou disponují vzorky ze sady 5 a nejnižší opět vzorky ze sady 6. Měření povrchové rezistivity však mohlo být poznamenáno nečistotami lpícími na vzorcích či nedostatečným vybitím mezi jednotlivými měřeními.

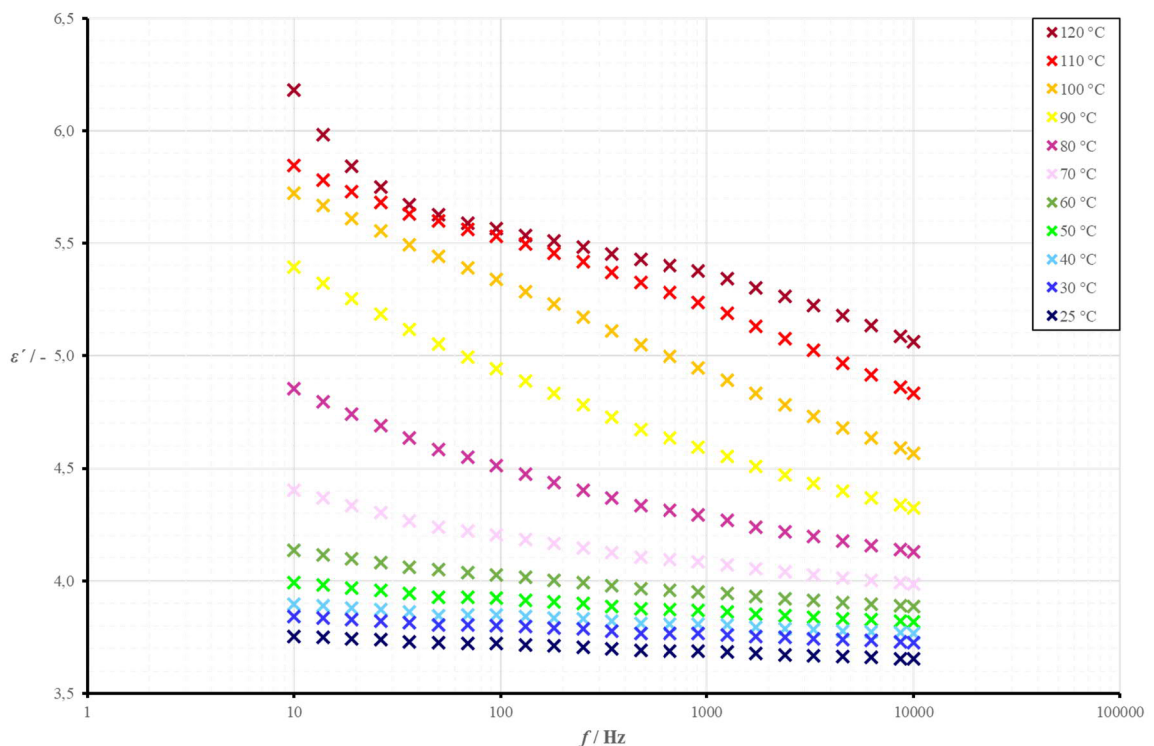
Tab. 5: Hodnoty vnitřního odporu  $R_v$  a povrchového odporu  $R_p$  včetně přepočtených hodnot vnitřních rezistivit  $\rho_v$  a povrchových rezistivit  $\rho_p$  pro různé sady vzorků

sada 1	$R_v$ [ $\Omega$ ]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$\rho_v$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]
A	1,5E+14	5,1E+14	4,1E+13	8,5E+15
B	1,1E+14	2,5E+14	3,0E+13	4,2E+15
C	2,5E+14	2,2E+15	5,8E+13	3,7E+16
$\emptyset$	1,7E+14	9,9E+14	<b>4,3E+13</b>	<b>1,6E+16</b>
sada 2	$R_v$ [ $\Omega$ ]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$\rho_v$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]
A	1,6E+14	6,3E+14	4,3E+13	1,1E+16
B	9,1E+13	1,7E+14	2,6E+13	2,8E+15
C	1,3E+14	2,1E+15	3,6E+13	3,6E+16
$\emptyset$	1,2E+14	9,8E+14	<b>3,5E+13</b>	<b>1,6E+16</b>
sada 3	$R_v$ [ $\Omega$ ]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$\rho_v$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]
A	1,4E+14	4,7E+14	4,0E+13	7,9E+15
B	1,5E+14	1,0E+15	4,0E+13	1,7E+16
C	1,2E+14	1,2E+15	3,3E+13	2,0E+16
$\emptyset$	1,3E+14	9,1E+14	<b>3,8E+13</b>	<b>1,5E+16</b>
sada 4	$R_v$ [ $\Omega$ ]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$\rho_v$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]
A	1,4E+14	1,7E+14	3,6E+13	2,9E+15
B	1,2E+13	1,2E+15	3,4E+12	2,0E+16
C	1,7E+14	2,2E+15	4,9E+13	3,6E+16
$\emptyset$	1,1E+14	1,2E+15	<b>2,9E+13</b>	<b>2,0E+16</b>
sada 5	$R_v$ [ $\Omega$ ]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$\rho_v$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]
A	1,7E+14	2,4E+14	5,1E+13	4,0E+15
B	1,1E+14	3,1E+14	3,3E+13	5,1E+15
C	1,8E+14	5,9E+14	4,6E+13	9,9E+15
$\emptyset$	1,5E+14	3,8E+14	<b>4,3E+13</b>	<b>6,3E+15</b>
sada 6	$R_v$ [ $\Omega$ ]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$\rho_v$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]
A	1,6E+14	2,2E+16	4,5E+13	3,6E+17
B	1,4E+14	4,1E+14	3,9E+13	6,8E+15
C	1,6E+15	1,3E+15	4,6E+14	2,1E+16
$\emptyset$	6,2E+14	7,7E+15	<b>1,8E+14</b>	<b>1,3E+17</b>
sada 7	$R_v$ [ $\Omega$ ]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$\rho_v$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]
A	2,4E+14	1,6E+15	6,5E+13	2,7E+16
B	1,7E+14	1,0E+15	4,6E+13	1,7E+16
C	1,2E+14	2,4E+14	3,7E+13	4,0E+15
$\emptyset$	1,8E+14	9,5E+14	<b>4,9E+13</b>	<b>1,6E+16</b>

Následující měření frekvenčních závislostí relativní permitivity, ztrátového čísla a ztrátového činitele pro různé teploty v rozsahu 25 °C až 120 °C bylo realizováno na analyzátoru Novocontrol Technologies s připojeným PC. Měření probíhalo v rozsahu kmitočtů od 10 Hz do 10 kHz při nastavené tloušťce elektrody 2 mm, hodnotě počátečního střídavého napětí 1 V a korekci kapacity 1,6 pF. Kroky teploty byly stanoveny na 10 °C. Vzorek byl zakládán do vakuové komory připojené na vakuovou pumpu a také k nádobě Dewar s přívodem vzduchu. Měření bylo realizováno pro 3 různé odličky z každé sady.

Z těchto získaných dat byly následně stanoveny průměrné hodnoty pro každou sadu a teplotu. Zpracované grafické závislosti pro sadu 1 jsou vyobrazeny na obr. 19, obr. 20, a obr. 22. Z důvodů výrazného nárůstu hodnot ztrátového čísla  $\varepsilon''$  a ztrátového činitele  $tg\delta$  při vyšších teplotách jsou na obr. 21 a obr. 23 zobrazeny detailnější pohledy na průběhy těchto veličin pouze při nízkých hodnotách. Veškeré zobrazené grafické závislosti jsou zobrazeny pouze pro sadu 1 z důvodů velkého objemu zpracovaných grafů. Zpracované grafické závislosti pro vzorky ze sad 2 až 7 jsou vyobrazeny v přílohách.

Z vynesené grafické závislosti relativní permitivity na obr. 19 vyplývá, že se zvyšujícími se kmitočty klesá velikost relativní permitivity a zároveň se zvyšující se teplotou tato závislost značně roste. V případě sady 1 je absolutní rozdíl relativní permitivity při pokojové teplotě cca 0,1, zatím co při dosažení teploty 120 °C tento rozdíl relativní permitivity mezi hodnotou při 10 Hz a 10 kHz vzrůstá až na 1,2. Při porovnání jednotlivých sad je při frekvenčních závislostech absolutní rozdíl relativní permitivity při teplotě 25 °C u všech vzorků odhadem  $0,1 \pm 0,05$ , přičemž nejvyšší rozdíl vykazuje sada 6 a nejmenší sada 3. Při teplotě 120 °C je tento rozdíl  $1,05 \pm 0,15$ .



Obr. 19: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity  $\varepsilon'$  pro různé úrovně teplot – sada 1

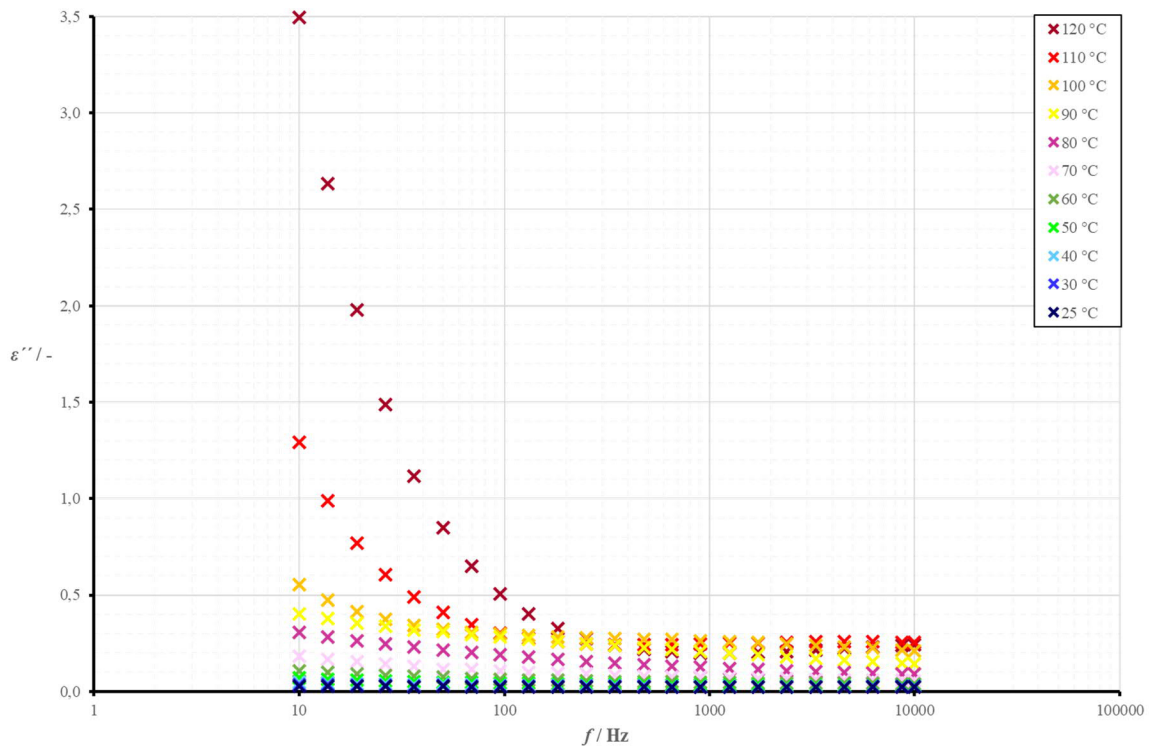


Dle obr. 20 byla potvrzena klesající tendence frekvenční závislosti ztrátového čísla, která se s rostoucí teplotou dále zvětšuje. Při teplotě 25 °C hodnoty ztrátového čísla u všech sad oscilují kolem hodnoty 0,025 vyjma vzorků ze sady 4 a sady 6, kde se hodnoty při pokojové teplotě pohybují okolo 0,035. Většina vzorků je při teplotním namáhání stabilní (maximální absolutní rozdíl mezi hodnotami ztrátového čísla při počáteční teplotě po danou teplotu je 0,1) do teploty 60 °C kromě vzorků ze sady 5 a 6, kdy do tolerance patří o hodnoty při teplotách 70 °C a u sady 7, kde jsou ztrátová čísla vzorků v absolutním rozdílu 0,1 od počáteční teploty dokonce po teplotu 90 °C. Při porovnání jednotlivých sad se jako vzorky s nejvyšším ztrátovým číslem jeví sada 1, kde hodnoty při teplotě 120 °C dosahují hodnoty 3,5 a naopak nejnižší ztrátové číslo při teplotě 120 °C má sada 7 s hodnotou 0,46.

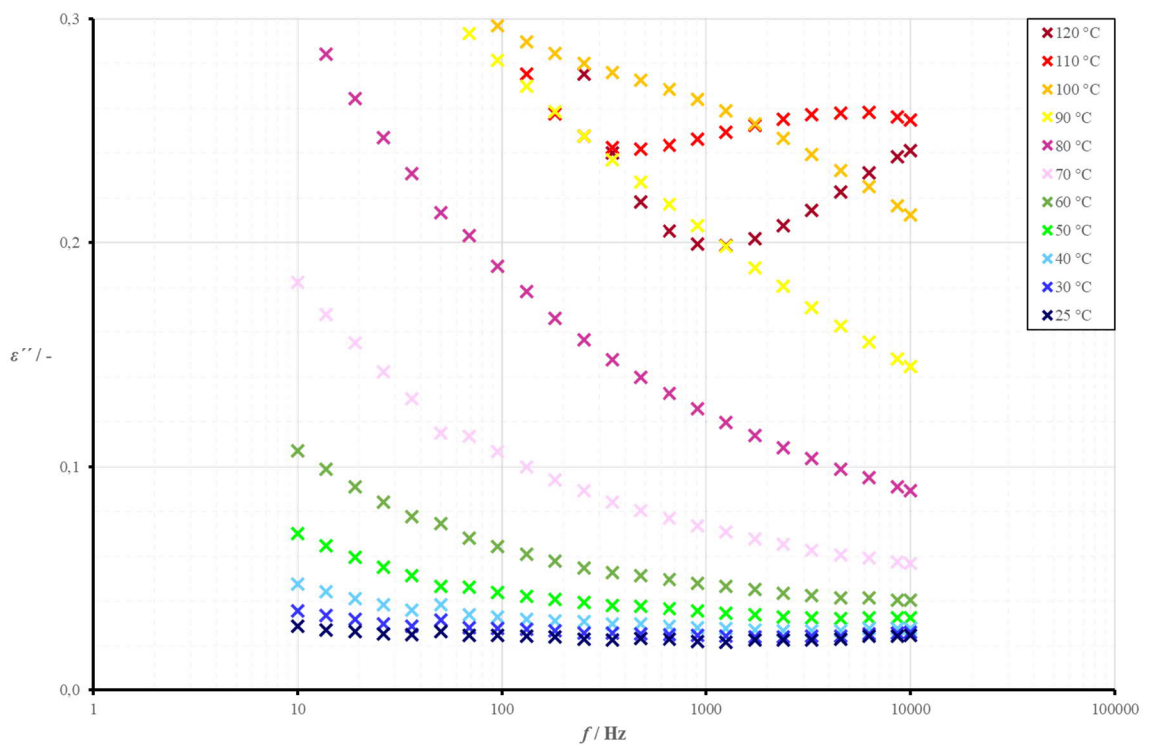
U detailního pohledu frekvenční závislosti ztrátového čísla na obr. 21 můžeme u závislosti pro teploty 110 °C a 120 °C pozorovat po klesajícím průběhu v první polovině frekvenčního rozsahu strmý nárůst hodnot po dosažení hodnoty 1 kHz. Tento jev souvisí s použitým typem flexibilizátoru. Dochází k překročení teploty skelného přechodu s čímž dochází ke změně mechanických vlastností jako je například měknutí materiálu. V důsledku těchto změn se následně mění i elektrické vlastnosti materiálů. Tento typ průběhu se vyskytuje i u ostatních sad vzorků mimo sady 6 a sady 7, u kterých ve zvoleném kmitočtovém rozsahu k ustálení ztrátového čísla nedošlo.

Frekvenční závislost ztrátového činitele pro různé teploty je znázorněna na obr. 22, ze kterého vyplývá, že se zvětšující se teplotou je klesající frekvenční závislost ztrátového činitele významnější. Detailnější zobrazení této závislosti je na obr. 23. Porovnáním jednotlivých sad zobrazených v příloze 5 a 7 bylo zjištěno, že hodnoty při pokojové teplotě ve většině případů kolísají kolem hodnoty  $0,065 \pm 0,005$  vyjma sady 1, kde hodnoty při teplotě 25 °C oscilují okolo hodnoty 0,003 a u sady 6 kolem hodnoty 0,009. Nejvyšší ztráty při teplotě 120 °C vykazuje sada 1 s hodnotou 0,56 a nejnižší naopak sada 7 s hodnotou 0,092. Zajímavý je také fakt, že u sady 6 i přes nejvyšší počáteční hodnotu ztrátového činitele při pokojové teplotě dosahuje vzorek při teplotě 120 °C třetí nejnižší hodnoty ztrátového činitele.

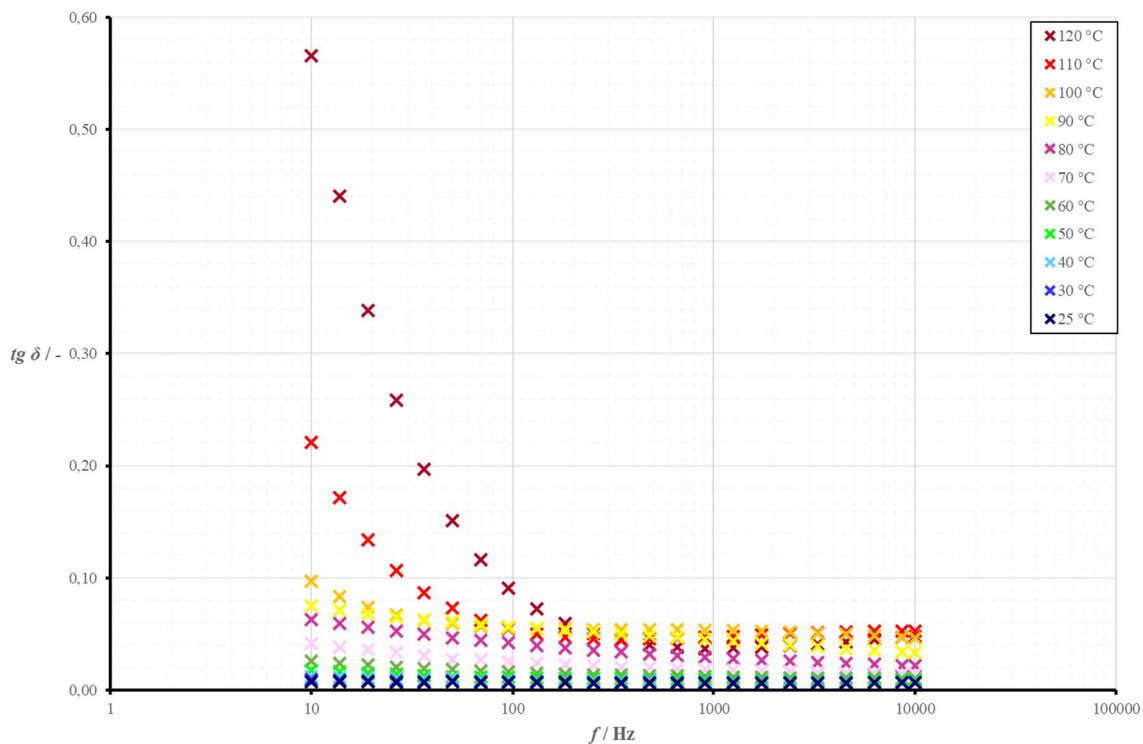
Dále je z detailního pohledu na obr. 23 vidět stejný zlom průběhu ztrátového činitele při teplotách 110 °C a 120 °C jako u předchozího měření ztrátového čísla. Jde opět o důsledek překročení teploty skelného přechodu a stejný jev vykazují i sady 1 až 5 v příloze 7. Sady vzorků 6 a 7 tento zlom nevykazují u žádné z měřených frekvenčních závislostí, a to z důvodu odlišného flexibilizujícího materiálu.



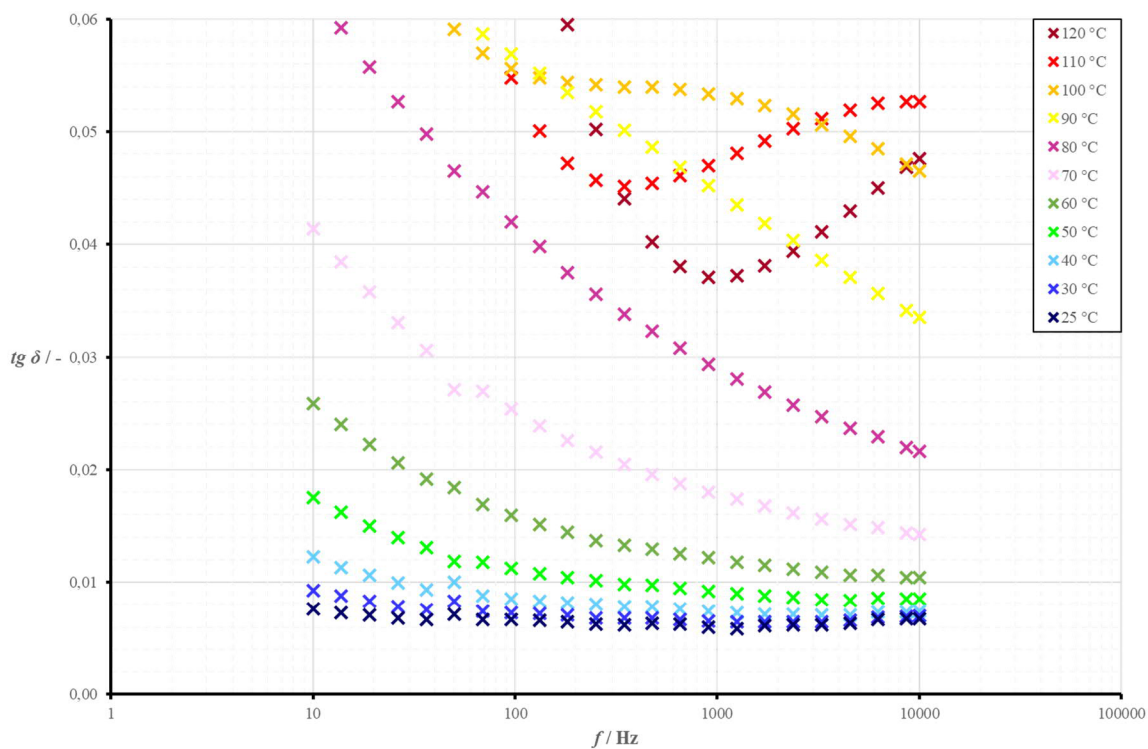
Obr. 20: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 1



Obr. 21: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 1



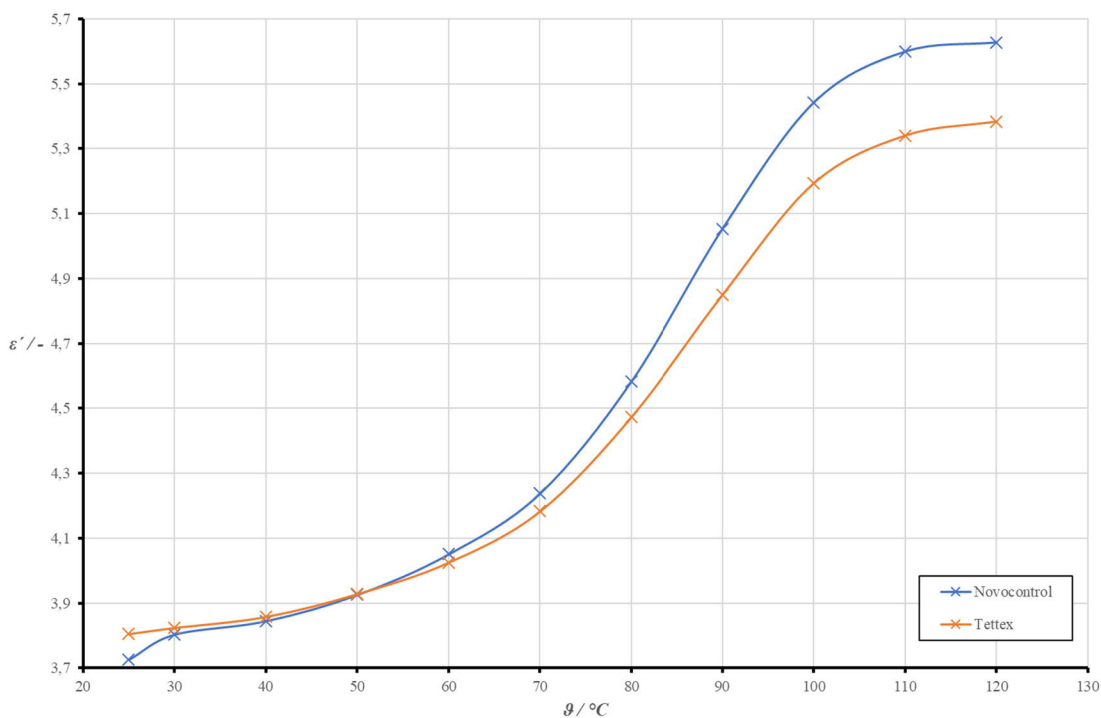
Obr. 22: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé úrovně teplot – sada 1



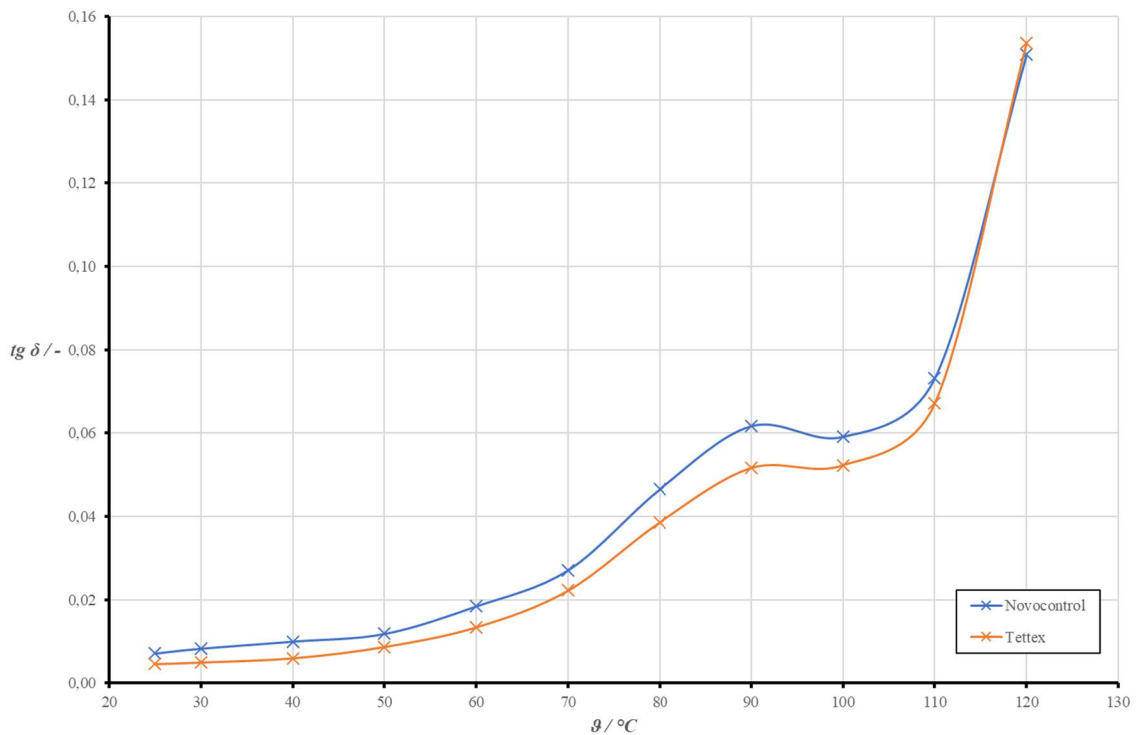
Obr. 23: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé úrovně teplot – sada 1

Jako ověření správnosti měření na obou přístrojích byly sestaveny grafické závislosti relativní permitivity  $\varepsilon'$  a ztrátového činitele  $tg\delta$  pro hodnotu kmitočtu 50 Hz. Tyto grafické závislosti pro sadu 1 na obr. 24 a obr. 25 srovnávají hodnoty získané z impedančního analyzátoru Tettex 2830/2831 s měřicím přípravkem Tettex 2914 s hodnotami získanými z širokopásmového impedančního analyzátoru Novocontrol Technologies.

Z porovnání teplotních závislostí relativní permitivity změřené na měřicích přístrojích Tettex a Novocontrol pro sadu 1 na obr. 24 byl zjištěn mírný rozdíl hodnot při koncové teplotě 120 °C. Vzhledem k tomu, že při počátečních teplotách byly hodnoty shodné bylo by možné koncový rozdíl roven hodnotě 0,2 přisoudit například různé době a kvalitě prohřátí vzorků. U porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele změřeného na měřicích přístrojích Tettex a Novocontrol pro sadu 1 na obr. 25 byly počáteční i koncové hodnoty shodné, pouze ve středu průběhu se mírně liší, avšak rozdíly byly vzhledem k jejich velikosti zanedbatelné. Taktéž u ostatních pozorovaných sad nebyly zjištěny žádné další závažné odchylky mezi hodnotami získanými na přístrojích Tettex a Novocontrol Technologies dle přílohy 8.



Obr. 24: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity  $\varepsilon'$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 1



Obr. 25: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  měřících přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 1

## 5.3 Přístroje použité pro realizaci praktické části

### 5.3.1 Digitální třmenový mikrometr Schut

Mikrometr digi Schut byl určen k měření tloušťek předložených vzorků a následnému určení průměrných tloušťek odlitků a určení nejvíce rovinných odlitků pomocí výběrových směrodatných odchylek.

Měřicí rozsah tohoto mikrometru je 0 až 25 mm, přičemž nulování je možné v libovolné poloze. Měřicí plochy jsou osazeny tvrdokovem a jejich průměr činí 6,5 mm. Rozlišení tohoto měřidla je 0,001 mm a přesnost:  $\pm 0,006$  mm.

### 5.3.2 Horkovzdušný sterilizátor BMT Stericell 111

Horkovzdušný sterilizátor BMT Stericell 111 vyobrazený na obr. 26 byl použit pro vysušení obdržných vzorků. Sušení probíhalo po dobu 3 dní na úrovni teploty 90 °C.



Obr. 26: Horkovzdušný sterilizátor BMT Stericell 111 [30]

Tento sterilizátor má 3 pevně nastavené sterilizační programy, přičemž je možné libovolně nastavit pracovní teplotu, dobu zahřívání a také čas zapnutí. Jeho základní parametry jsou zaznamenány v tab. 6.

Tab. 6: Technické parametry horkovzdušného sterilizátoru BMT Stericell 111 [30]

Parametr	Hodnota
Objem komory	111 l
Rozměr komory h x š x v	390 x 540 x 530 mm
Teplotní rozsah	+10 °C nad okolí do 250 °C
Počet sít	2 – 7 ks
Nosnost síta	20 kg/síto
Nosnost skříně	50 kg
Hmotnost	87 kg

### 5.3.3 Exsikátor

Skleněný exsikátor bez vývěvy byl použit pro udržení nízké hodnoty vlhkosti obsažené ve vzorcích a k zabránění navlhání vysušených vzorků vytvrzených epoxidových licích směsí.

### 5.3.4 Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831

Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831 zachycen na obr. 27 slouží k měření izolantů s velmi malou hodnotou ztrátového činitele. Přístroj slouží jako analyzátor kapalných (zejména olejů) i pevných dielektrik.



Obr. 27: Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831 [31]

Přístroj umožňuje rychlejší a měření elektrických vlastností izolačních materiálů v kapalném i pevném provedení. Mezi měřené parametry patří ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$ , kapacita  $C$ , relativní permitivita  $\epsilon_r$  a rezistivita  $\rho$ . Analyzátor se skládá z části 2830, která obsahuje měřicí most a řídicí jednotku a části 2831, která zastupuje rozšiřovací jednotku složenou z regulátoru teploty, kondenzátor a zdroj napájení ve stejnosměrném i střídavém provedení. Důležité parametry daného přístroje jsou uvedeny v tab. 7. [31]

Tab. 7: Technické parametry impedančního analyzátoru Tettex 2830/2831 [31]

Parametr	Rozsah	Rozlišení	Přesnost
Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$	0 .. 100	$1 \times 10^{-5}$	$\pm 0,5 \% \text{ rdg} \pm 1 \times 10^{-5}$
Kapacita $C$	$\geq 10 \text{ pF}$	0,001 pF	$\pm 0,2 \% \text{ rdg} \pm 0,01 \text{ pF}$
Relativní permitivita $\epsilon_r$	1 .. 30	$1 \times 10^{-3}$	
Odpor $R$	120 k $\Omega$ .. 5T $\Omega$	1k $\Omega$	<1T $\Omega$ $\pm 5 \% \text{ rdg} + 3 \text{ digits}$ > 1T $\Omega$ $\pm 15 \% \text{ rdg} + 3 \text{ digits}$
Frekvence	45 – 65 Hz	0,1 Hz	$\pm 0,1 \% \text{ rdg} \pm 0,1 \text{ Hz}$
Regulátor topení	Okolní – 200 °C	0,1 °C	$\pm 0,5 \text{ °C}$
AC testovací napětí	5 .. 2500 V	1 V	$\pm 0,3 \% \text{ rdg} \pm 1 \text{ V}$
DC testovací napětí	250 – 2500 C	25 V	$\pm 10 \% \text{ rdg} + 20 \text{ V}$



### 5.3.5 Měřicí přípravek Tettex 2914 pro pevné dielektrické materiály

Měřicí přípravek Tettex 2914 slouží k připojení k analyzátoru Tettex 2830/2831. Přístroj je schopný díky přípravku realizovat měření ztrátového činitele  $\text{tg}\delta$  a relativní permitivity  $\epsilon_r$  u pevných izolačních materiálech.



Obr. 28: Měřicí přípravek Tettex 2914 [32]

Tento měřicí přípravek znázorněný na obr. 28 je tříelektrodový systém s vyhřívaným deskovým kondenzátorem. Horní část přístroje je tvořena měřicí a ochrannou elektrodou, které lze nastavit pomocí hydraulického systému. Spodní část obsahuje vysokonapěťovou elektrodu. Charakteristické parametry jsou uvedeny v tab. 8. [32]

Tab. 8: Technické parametry měřicího přípravku Tettex 2014 pro pevná dielektrika [32]

Parametr	Hodnota
Průměr měřicí elektrody	49,5 mm
Šířka ochranné elektrody	10 mm
Vzdálenost mezi ochrannou a měřicí elektrodou	1 mm
Maximální hodnota teploty	200 °C
Maximální hodnota pracovního napětí	2000 V



### 5.3.6 Širokopásmový impedanční analyzátor Novocontrol Technologies

Širokopásmový impedanční analyzátor od firmy Novocontrol Technologies byl použit pro měření závislosti vnitřního odporu na teplotě a kmitočtu v rozsahu teplot 25 °C až 120 °C.



Obr. 29: Měřicí sestava s širokopásmovým impedančním analyzátozem Novocontrol Technologies [33]

Celá měřicí sestava je zobrazena na obr. 29 a skládá se z několika komponent, mezi něž patří elektrodový systém, napájecí zdroj, analyzátor Alpha-A a Electrometer/High resistance meter Keithley. Systém je propojený s PC, který obsahuje měřicí a ovládací software WinDETA. Získané hodnoty přes rozhraní IEEE 488 se ukládají do souborů s formátem TXT. Základní technické parametry širokopásmového impedančního analyzátoru Novocontrol Technologies jsou zaznamenány v tab. 9. [33] [34]

Tab. 9: Technické parametry širokopásmového impedančního analyzátoru Novocontrol Technologies [33] [34]

Parametr	Hodnota
Rozsah střídavého napětí	100 $\mu$ V – 3V
Frekvenční rozsah	3 $\mu$ Hz – 40 MHz
Rozsah teplot	-160 °C – 400 °C
Průměr měřicí elektrody	20 mm
Průměr napěťové elektrody	40 mm
Rozlišení ztrátového činitele $\text{tg}\delta$	10 <sup>-5</sup>

### 5.3.7 Agilent 4339B Resistance Meter

Měřicí zařízení Agilent 4339B High Resistance Meter zobrazený na obr. 30 byl použit pro určení hodnot nabíjecího a vybíjecího proudu při pokojové teplotě. Z těchto dat byly následně určeny velikosti vnitřní a povrchové rezistivity.



Obr. 30: Měřicí přístroj Agilent 4339B High Resistance Meter [35]

Přístroj Agilent 4339B přenáší dat do PC pomocí programu VEE distribuovaným taktéž firmou Agilent Technologies a byl použit z důvodu velkých hodnot vnitřní a povrchové rezistivity, které byly na přístroji Tettex 2830/2831 mimo rozsah měřicího přístroje. Základní technické parametry Agilent 4339B High Resistance Meter jsou zaznamenány v tab. 10. [35]

Tab. 10: Technické parametry přístroje Agilent 4339B High Resistance Meter [35]

Parametr	Hodnota
Rozsah měřicího přístroje	$10^3 \Omega - 1.6 \times 10^{16} \Omega$
Rychlost měření	10 ms

### 5.3.8 Agilent 16008B Resistivity Cell

Tříelektrodový měřicí systém Agilent 16008B Resistivity Cell byl použit v zapojení s přístrojem Agilent 4339B High Resistance Meter pro stanovení hodnot vnitřního a povrchového odporu při pokojové teplotě.



Obr. 31: Tříelektrodový měřicí systém Agilent 16008B Resistivity Cell [36]

Měřicí přístroj Agilent 16008B Resistivity Cell zobrazený na obr. 31 je vybavený napěťovou, ochranou a měřicí elektrodou o průměrech 50 mm, 70 mm a 10 mm s nastavitelným přtlakem. Základní technické parametry jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11: Technické parametry přístroje Agilent 16008B Resistivity Cell [36]

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Hodnota zatížení	Až 10 kg
Hodnota pracovního napětí	Až 1000 V DC
Maximální hodnota proudu	10 mA
Množství vlhkosti	Až 70 % RH
Rozsah okolních teplot	-30 °C až 100 °C

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo prostudování základů chemických a fyzikálních vlastností dielektrických materiálů se zaměřením na epoxidové pryskyřice, seznámit se s vybranými diagnostickými metodami a navrhnout vhodnou metodiku měření vybraných elektrických vlastností předložených vzorků epoxidových pryskyřic v teplotní a kmitočtové závislosti. Dále v rámci experimentální části bylo cílem u předložených vzorků vytvrzených epoxidových licích směsí provést měření relativní permitivity a ztrátového činitele v závislosti na teplotě v určeném rozsahu teplot a také provést měření závislosti vnitřního odporu na teplotě a kmitočtu v témže teplotním rozsahu. Dalším úkolem bylo zhodnotit a porovnat jednotlivá měření a výsledky a porovnat je s teoretickými předpoklady.

V první části diplomové práce byl sepsán teoretický přehled, ve kterém byly objasněny základní parametry a vlivy spojené se zalévacím procesem epoxidů. Nejprve byl zahrnut popis a výroba přístrojových transformátorů ve firmě ABB s.r.o., která zadala tuto práci s cílem porovnání dielektrických vlastností používaných typů epoxidových licích směsí s jinými typy s rozdílnými druhy flexibilizátorů. V části výroby je zahrnut nejen popis používaných bandážovacích materiálů, ale také používané složky při míchání epoxidové licí směsi, následné možnosti procesu zalévání a jejich realizace a v neposlední řadě také vytvrzování zalitých transformátorů. Další kapitola této práce pojednává o vlastnostech dielektrických materiálů s následným podrobnějším popisem parametrů, jako jsou komplexní a relativní permitivita, dielektrická polarizace, dielektrické ztráty a ztrátový činitel, rezistivita vnitřní i povrchová, vlhkost a její vlastnosti a vlivy a v závěru kapitoly také tepelné vlastnosti a jejich vliv na epoxidové pryskyřici. Poslední teoretická část zahrnuje popis diagnostických metod používaných pro měření ztrátového činitele, rezistivity a relativní permitivity. Konkrétně byly popsány metody impedanční spektroskopie, Wheatstonova můstku, metoda voltampérová a postupy měření při použití Scheringova můstku a Q-metru.

Praktická část měla za cíl proměřit elektrické vlastnosti 7 druhů vytvrzených epoxidových licích směsí s odlišným druhem flexibilizátoru. Vzorky byly dodány po 9 až 10 kusech odlitků od každé sady prostřednictvím firmy ABB s.r.o. od firmy SYNPO a.s., kde byly rovněž nařezány na požadované rozměry a tvary. Tato část diplomové práce obsahuje v úvodu popis vzorků a jejich přípravu na měření, což zahrnuje měření tloušťek dodaných vzorků, jehož výsledky jsou uvedeny v přílohách 1 a 2, a určení vhodných odlitků pro realizaci experimentální části. Před samotným měřením bylo nutné dodané vzorky umístit do horkovzdušného sterilizátoru za cílem zbavení odlitků co největšího možného množství obsažené vlhkosti a následně je umístit do exsikátoru pro zabránění opětovnému navlhnutí. Po těchto krocích následovalo již samotné měření, jehož výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.2 a přílohách 3 až 8.

V neposlední řadě zahrnuje praktická část také seznam a popis použitých přístrojů potřebných pro realizaci měření včetně jejich základních parametrů a vlastností.

Výstupem z první části měření realizované na přístroji Tettex 2830/2831 s připojeným měřicím přípravkem Tettex 2914 byly získány hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$ , relativní permitivity  $\epsilon'$  a vnitřní rezistivity  $\rho_v$  pro kmitočet 50 Hz v teplotním rozsahu 25 °C až 120 °C. Při měření byl nastaven konstantní přitlak 5 N/cm<sup>2</sup>, napětí 500 V pro měření ztrátového činitele a relativní permitivity a pro měření vnitřní rezistivity byla hodnota napětí 1,8 kV přičemž bylo potřeba vzorek před měřením po dobu 1 minuty vybit. Časový interval mezi jednotlivými měření pro ustálení teploty byl zvolen 30 minut. Celé realizované měření probíhalo dle normy ČSN IEC 250.

Získaná data pro ztrátový činitel  $tg\delta$  jsou zaznamenána v tab. 2 a z ní vynesené grafické závislosti na obr. 16. Z této grafické závislosti je znatelné, že se zvyšující se teplotou roste také ztrátový činitel, což odpovídá teoretickým předpokladům. Počáteční hodnoty ztrátového činitele při pokojové teplotě jsou u všech vzorků okolo úrovně 0,0045 mimo vzorku 6, u kterého je tato hodnota 0,00737, avšak koncové hodnoty při zatížení 120 °C se pohybují okolo 0,135±0,015 vyjma sady 5 a 7, kde je velikost ztrátového činitele menší než 0,1. Zlomová část průběhu nastává po dosažení teploty 60 °C, kdy hodnoty začínají stoupat a následně při teplotě 100 °C začínají průběhy vykazovat prudký nárůst. Z tohoto grafu taktéž je zřetelné, že nejnižší hodnoty ztrátového činitele byly naměřeny pro vzorky ze sady 7, která také v porovnání s ostatními vzorky vykazuje nejméně strmý průběh, což platí i pro sadu 5. Naopak nejvyšší hodnoty ztrátového činitele se vyskytovaly u vzorků ze sady 1.

Údaje pro relativní permitivitu  $\epsilon'$  jsou zaznamenány v tab. 3 a příslušná grafická závislost na obr. 17. Z tohoto grafu vyplývá, že se zvyšující se teplotou rostou i hodnoty relativní permitivity, což potvrzuje i teorie. Při pokojové teplotě dosahuje relativní permitivita hodnot 3,8±0,1, zatím co při nejvyšších hodnotách teplot jsou hodnota relativní permitivity pro jednotlivé sady 4,9±0,5. V rozmezí teplot 70 °C až 110 °C vykazují vzorky nejstrmější průběh, avšak při vyšších teplotách již průběhy nevykazují tak rapidní zvýšení. Nejnižších hodnot nabývají opět vzorky ze sady 7 a její průběh je společně se sadou 6 nejlineárnější v porovnání s ostatními. Nejvyšších hodnot relativní permitivity nabývají vzorky ze sady 1.

Získané hodnoty vnitřní rezistivity  $\rho_v$  jsou zaznamenány v tab. 4 a vynesené grafické závislosti na obr. 18. V tab. 4 můžeme pozorovat, že pro většinu sad nejsou hodnoty do 60 °C zaznamenány, a to z toho důvodu, že rozsah zvoleného přístroje byl do 10<sup>12</sup> Ωm. Grafická závislosti zobrazuje pokles vnitřní rezistivity se zvyšující se teplotou, což koresponduje s teoretickými předpoklady. Grafická závislost klesá s téměř stejnou významností u všech sad vyjma sady 7, kde byla vnitřní rezistivita změřena až po dosažení teploty 110 °C. Z tohoto důvodu bylo měření rozšířeno o měření na přístroji Agilent 4339B Resistance meter v zapojení s Agilent 16008B Rezistivity Cell, na kterém byly doměřeny hodnoty vnitřního i povrchového odporu při pokojové teplotě 25 °C. Ze získaných hodnot měřených při konstantním napětí 1000 V po dobu 6 s byly dle vzorců 5.2 a 5.3 vypočteny vnitřní a povrchové rezistivity. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v tab. 5. Nejvyšší zaznamenaná vnitřní rezistivita byla u sady 7 a naopak nejnižší se vyskytovala u sady 6, naopak nejvyšší povrchovou rezistivitou disponují vzorky ze sady 5 a nejnižší opět vzorky ze sady 6.

Předmětem další části měření bylo měření frekvenčních závislostí relativní permitivity  $\epsilon'$ , ztrátového čísla  $\epsilon''$  a ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé teploty v rozsahu 25 °C až 120 °C bylo realizováno na analyzátoru Novocontrol Technologies. Měření probíhalo v rozsahu kmitočtů od 10 Hz do 10 kHz při nastavené tloušťce elektrody 2 mm, hodnotě počátečního střídavého napětí 1 V a korekci kapacity 1,6 pF. Kroky teploty byly stanoveny na 10 °C. Z těchto získaných dat byly následně stanoveny průměrné hodnoty pro každou sadu a teplotu. Zpracované grafické závislosti pro sadu 1 jsou vyobrazeny na obr. 19, obr. 20, a obr. 22. Z důvodů výrazného nárůstu hodnot ztrátového čísla a ztrátového činitele při vyšších teplotách jsou na obr. 21 a obr. 23 zobrazeny detailnější pohledy na průběh. Zpracované grafické závislosti pro vzorky ze sad 2 až 7 jsou vyobrazeny v přílohách 2 až 7.

Z vynesené grafické závislosti relativní permitivity na obr. 19 vyplývá, že se zvyšujícími se kmitočty klesá velikost relativní permitivity a zároveň se zvyšující se teplotou tato závislost značně roste. Toto zjištění potvrzují i teoretické předpoklady. V případě sady 1 je absolutní rozdíl relativní permitivity při pokojové teplotě cca 0,1, zatím co při dosažení teploty 120 °C tento rozdíl relativní permitivity mezi hodnotou při 10 Hz a 10 kHz vzrůstá až na 1,1. Při porovnání jednotlivých sad je při frekvenčních závislostech absolutní rozdíl relativní permitivity při teplotě 25 °C u všech vzorků odhadem 0,1 mimo sadu 6, kde je tento rozdíl 1,2. Při teplotě 120 °C je tento rozdíl  $1,05 \pm 0,05$  opět vyjma sady 6, kde je tato hodnota 1,2 a sady 7 kde je rozdíl 0,8.

Dle obr. 20 byla potvrzena klesající tendence frekvenční závislosti ztrátového čísla, která se s rostoucí teplotou dále zvětšuje. Při teplotě 25 °C velikost ztrátového čísla u všech sad osciluje kolem hodnoty 0,025 vyjma vzorků ze sady 4 a sady 6, kde se hodnoty při pokojové teplotě pohybují okolo 0,035. Při porovnání jednotlivých sad se jako vzorky s nejvyšším ztrátovým číslem jeví sada 1, kde hodnoty při teplotě 120 °C dosahují hodnoty 3,5 a naopak nejnižší ztrátové číslo při teplotě 120 °C má sada 7 s hodnotou 0,46.

U detailního pohledu na frekvenční závislost ztrátového čísla na obr. 21 můžeme u závislostí pro teploty 110 °C a 120 °C pozorovat po klesajícím průběhu v první polovině frekvenčního rozsahu strmý nárůst hodnot po dosažení hodnoty 1 kHz. Tento jev se vyskytuje i u ostatních sad mimo sady 6 a sady 7, u kterých ve zvoleném kmitočtovém rozsahu k ustálení ztrátového čísla nedošlo a je důsledkem změn elektrických veličin a mechanických změn, které jsou následkem překročení teploty skelného přechodu. Tento jev také souvisí s druhem použitého flexibilizátoru v příslušné lici směsi.

Frekvenční závislost ztrátového činitele pro různé teploty je znázorněna na obr. 22, ze kterého vyplývá, že se zvětšující se teplotou je klesající frekvenční závislost ztrátového činitele významnější, což potvrzují o teoretické poznatky. Detailnější zobrazení této závislosti je na obr. 23. Porovnáním jednotlivých sad zobrazených v příloze 5 a 7 bylo zjištěno, že hodnoty při pokojové teplotě ve většině případů kolísají kolem hodnoty  $0,065 \pm 0,005$  vyjma sady 1, kde hodnoty při teplotě 25 °C oscilují okolo hodnoty 0,003, a u sady 6 kolem hodnoty 0,009. Nejvyšší ztráty při teplotě 120 °C vykazuje sada 1 s hodnotou 0,56 a nejnižší naopak sada 7 s hodnotou 0,092. Zajímavý je také fakt, že u sady 6 i přes nejvyšší počáteční hodnotu ztrátového činitele při pokojové teplotě dosahuje vzorek při teplotě 120 °C třetí nejnižší hodnoty ztrátového činitele.

Dále je z detailních pohledů na frekvenční závislost ztrátového činitele v příloze 7 při teplotě 120 °C vidět pro sady 1 až 5 zlom grafické závislosti po dosažení frekvence přibližně 1 kHz, který je opět důsledkem překročení teploty skelného přechodu stejně jako v předchozích frekvenčních závislostech ztrátového čísla při použití určitého typu flexibilizátoru.

Jako ověření správnosti měření a porovnání hodnot získaných z impedančního analyzátoru Tettex 2830/2831 s měřicím přípravkem Tettex 2914 s hodnotami získanými z širokopásmového impedančního analyzátoru Novocontrol Technologies. V rámci tohoto srovnání byly sestaveny grafické závislosti relativní permitivity  $\varepsilon'$  a ztrátového činitele  $tg\delta$  pro hodnotu kmitočtu 50 Hz a jsou zobrazeny na obr. 24 a obr. 25 pro sadu 1 a pro ostatní sady se nacházejí v příloze 8. Z porovnání teplotních závislostí relativní permitivity pro sadu 1 na obr. 24 byl zjištěn mírný rozdíl hodnot při koncové teplotě 120 °C. Vzhledem k tomu, že při počátečních teplotách byly hodnoty shodné bylo by možné koncový rozdíl roven hodnotě 0,2 přisoudit například různé době a kvalitě prohřátí vzorků. U porovnání teplotních závislostí ztrátového pro sadu 1 na obr. 25 byly počáteční i koncové hodnoty shodné, pouze ve středu průběhu se mírně liší, avšak rozdíly byly vzhledem k jejich velikosti zanedbatelné. Taktéž u ostatních pozorovaných sad nebyly zjištěny žádné další závažné odchylky mezi hodnotami obou přístrojů dle přílohy 8.

Po zhodnocení všech elektrických vlastností a porovnání jednotlivých sad vzorků se z pohledu elektrických vlastností jeví nejvhodnější epoxidová licí směs použitá při vytvrzování sady 7, která nabývala nejnižších hodnot ztrátového činitele při teplotním i frekvenčním namáhání, taktéž relativní permitivita byla nejnižší ze všech předložených sad a také sada dosahovala nejvyšších hodnot vnitřní permitivity. Další směs s nejlepšími výsledky byla ze sady 6, avšak i přes malou relativní permitivitu a ztrátový činitel tato sada nabývala nejnižších hodnot vnitřní rezistivity v porovnání s ostatními sadami. Jako sada s nejméně přívětivými elektrickými vlastnostmi se jeví sada 1, jelikož vykazuje nejvyšší ztráty i hodnoty relativní permitivity.

Vzhledem k výsledkům se sada 1 po vyhodnocení základních elektrických vlastností jeví jako nejméně vhodná. Z tohoto pohledu se pro výrobu přístrojových transformátorů jako nejvhodnější jeví licí směsi použité při vytvrzování sady 6 a 7. Avšak při volbě vhodné licí směsi je nutné brát ohled i na ostatní vlastnosti jako např. houževnatost a pevnost po vytvrzení apod. Některé vzorky totiž při teplotním namáhání vykazovaly při dosažení teploty 120 °C měknutí, což vede k narušení struktury daného materiálu a chemickým změnám souvisejícími s překročení teploty skelného přechodu. Z toho plyne, že určení vhodné licí směsi pro kvalitní výrobu přístrojových transformátorů nejsou stěžejní pouze elektrické, ale i další mechanické a chemické materiálové vlastnosti.

# LITERATURA

- [1] STÝSKALA, V. *Transformátory*. Ostrava, 1998. Skriptum.
- [2] KUTA, A. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. 1999. Praha: VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-367-7.
- [3] *Vlastnosti, příprava a zpracování epoxidových licích hmot vakuovým a tlakovým litím, ostatní hmoty*. 2006. Brno: ABB technická norma, 2006.
- [4] MICHLÍČEK, P. *Simulace odlévání epoxidu do forem přístrojových transformátorů a senzorů vysokého napětí*. Brno, 2007. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] KORVASOVÁ, I. *Studium mechanismu vytvrzování epoxidových pryskyřic*. Zlín, 1992. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta technologická.
- [6] EHRENSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: Scentia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6. EAN: 9788086960296.
- [7] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [8] POLJAK, F. *Dielektriká, izolanty*. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1983.
- [9] ŠAVEL, J. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 978-80-7300-190-2.
- [10] JIRÁK, J, R AUTRATA, K LIEDERMANN, Z ROZSÍVALOVÁ a M SEDLAŘÍKOVÁ. *Materiály a technická dokumentace, materiály v elektrotechnice*. Brno, b.r. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [11] ROZSÍVALOVÁ, Z, P KŘIVÁK a J VANĚK. *Materiály a technická dokumentace, laboratorní cvičení*. Brno, 2013. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [12] Dielektrika. *Dielektrika* [online]. b.r. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/teordiel.html>
- [13] ČSN EN 80000:2008: *Veličiny a jednotky - Část 6: Elektromagnetismus*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [14] BERKA, Š. *Elektrotechnická schémata a zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-254-1.
- [15] MLEZIVA, J. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.



- [16] PROKOPOVÁ, I. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [17] ŠKARABELOVÁ, L. *Degradace epoxidových pryskyřic s různými plnivý slunečním zářením*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..
- [18] ŠEBESTA, P. *Stanovení podílu vlhkosti v elektroizolačních materiálech* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/34148>
- [19] PŘIKRYL, T. *Absorpční charakteristiky namáhaných drážkových izolací* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/17067>. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [20] LIEDERMANN, K. *Klimatotechnologie*. Brno, 2006. Skriptum. Vysokého učení technické v Brně UETE.
- [21] JUNEK, J. *Konstrukční návrh průmyslové sušárny* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/23778>. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [22] KOČMAN, V. *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů - Izolanty A*. Brno: Státní nakladatelství technické literatury, 1971, 528 s. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] LUTZ, B. a J. KINDERSBERGER. Influence of absorbed water on volume resistivity of epoxy resin insulators. *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. IEEE, 2010, , 1-4. DOI: 10.1109/ICSD.2010.5568218. ISBN 978-1-4244-7945-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5568218/>
- [24] MIJOVIC, J. a B. FITZ. *Dielectric Spectroscopy of Reactive Polymers* [online]. 1998. NY: Department of Chemical Engineering, Chemistry and Materials Science, Polytechnic University, 1998 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: [http://novocontrol.de/pdf\\_s/APND2.PDF](http://novocontrol.de/pdf_s/APND2.PDF)
- [25] CHUNG, D. D. L. *Advances in Cement Research: Electrically conductive cement-based materials*. 2004, 16 (4). 167-176. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1680/adcr.2004.16.4.167>
- [26] TATARKOVIC, M., G. BRONCOVA a M. KRONĎÁK. Elektroimpedanční spektroskopie a její využití v chemické analýze. *Chemické listy*. 2012, 8. ISSN 1213-7103.
- [27] MACDONALD, J. R. *Impedance spectroscopy: Annals of Biomedical Engineering*. 1992, , 20, 289-305 s.

- [28] ČSN IEC 93 *Metody měření vnitřní rezistivity a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [29] 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] Návod k použití - Horkovzdušný sterilizátor STERICELL 22, 55, 111, 222, 222/2, 404, 404/2. In: *BMT MMM Group* [online]. Brno: BMT Medical Technology s.r.o., 2008 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <http://www.bmt.cz/stericell-1111403>
- [31] Operating Instructions - Tettex 2830/2831 Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer: Version 2.0. In: *Tettex 2830 dielectric analyzer* [online]. Switzerland: Haefely Test AG, 2013 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://update.haefely.com/CT2830/>
- [32] Operating Instructions - Tettex 2914 Test Cell for Solid Insulating Materials: Version 1.0. In: *Haefely Hipotronics* [online]. Switzerland: Haefely Test AG, 2016 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/2914-solid-test-cell/>
- [33] Owner's manual - Quatro Cryosystem 6.5. In: *Novocontrol Technologies* [online]. Germany: Novocontrol Technologies GmbH & Co. KG, 2014 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.novocontrol.de>
- [34] User's manual - WinDETA 5.85. In: *Novocontrol Technologies* [online]. Germany: Novocontrol Technologies GmbH & Co. KG, 2014 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.novocontrol.de>
- [35] Agilent 4339B/4349B High Resistance Meters - Technical Overview. In: *Keysight Technologies* [online]. USA: Agilent Technologies, 2008 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/en/pd-1000000860%3Aepsg%3Apro-pn-4339B/high-resistan>
- [36] Agilent 16008B Resistivity Cell - Operation and Service Manual. In: *Keysight Technologies* [online]. Malaysia: Agilent Technologies, 2000 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/en/pd-1000000044%3Aepsg%3Apro-pn-16008B/resistivity-cell?cc=US&lc=eng>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$\alpha$	[-]	Distribuční parametr
$\beta$	[-]	Distribuční parametr
$\varepsilon_0$	[-]	Permitivita vakua
$\boldsymbol{\varepsilon}^*$	[-]	Komplexní permitivita
$\boldsymbol{\varepsilon}'$	[-]	Reálná složka komplexní permitivity
$\boldsymbol{\varepsilon}''$	[-]	Ztrátové číslo
$\varepsilon_s$	[-]	Statická relativní permitivita
$\varepsilon_\infty$	[-]	Optická relativní permitivita
$\tau$	[s]	Relaxační doba
$\Phi_1$	[Wb]	Magnetický indukční tok
$\boldsymbol{\omega}$	[rads <sup>-1</sup> ]	Úhlový kmitočet
$\rho_v$	[ $\Omega$ m]	Vnitřní rezistivita
$\rho_p$	[ $\Omega$ ]	Povrchová rezistivita
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Jednotková plocha
$B$	[-]	Součinitel elektrodového systému
$c$	[m]	Vzdálenost mezi ochrannou a měřicí elektrodou
$C$	[F]	Elektrická kapacita
$C_0$	[F]	Geometrická kapacita
$C_p$	[F]	Kapacita paralelního náhradního obvodu
$C_s$	[F]	Kapacita sériového náhradního obvodu
$C_x$	[F]	Kapacita měřeného materiálu
$d$	[m]	Průměr měřeného vzorku
$\vec{D}_0$	[Cm <sup>-2</sup> ]	Elektrická indukce ve vakuu
$\vec{D}$	[Cm <sup>-2</sup> ]	Elektrická indukce
$D$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Difúzní koeficient
$\vec{E}$	[Vm <sup>-1</sup> ]	Intenzita elektrického pole
$E_p$	[Vm <sup>-1</sup> ]	Elektrická pevnost
$f$	[Hz]	Frekvence
$F$	[N]	Působící síla
$gradc$	[mol.m <sup>-4</sup> ]	Gradient koncentrace

$h$	[m]	Tloušťka izolantu
$I$	[A]	Elektrický proud
$j$	[mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Hustota difúzního toku
$L$	[H]	Indukčnost
$\vec{P}$	[Cm <sup>-2</sup> ]	Elektrická polarizace
$R$	[Ω]	Elektrický odpor
$R_p$	[Ω]	Povrchový odpor
$R_p$	[Ω]	Rezistivita paralelního náhradního obvodu
$R_s$	[Ω]	Rezistivita sériového náhradního obvodu
$R_v$	[Ω]	Vnitřní odpor
$S$	[-]	Elastická deformace
$S_{ef}$	[m <sup>2</sup> ]	Efektivní plocha elektrody
$s$	[m]	Výběrová směrodatná odchylka tloušťky vzorku
$T$	[N.m <sup>-2</sup> ]	Elastické napětí
$tg\delta$	[-]	Ztrátový činitel
$U$	[V]	Elektrické napětí
$U_p$	[V]	Průrazné napětí
$Q$	[C]	Elektrický náboj
$\bar{x}$	[m]	Aritmetický průměr tloušťky vzorku
$Z_C$	[Ω]	Impedance kondenzátoru
$Z_L$	[Ω]	Impedance cívky
$Z_R$	[Ω]	Impedance rezistoru

APG	Automatic pressure gelation
IS	Impedanční spektroskopie
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
RIM	Reaction injection moulding
TTT	Time – Temperature – Transition

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma zapojení měřicího transformátoru napětí [1] .....	9
Obr. 2: Schéma zapojení přístrojového transformátoru proudu [1] .....	10
Obr. 3: Příprava epoxidové licí hmoty [4] .....	12
Obr. 4: TTT diagram [6] .....	13
Obr. 5: Ideální tvar Cole-Cole diagramu [7] .....	15
Obr. 6: Vliv koeficientu distribuce na grafické závislosti Debyeho funkcí [10] .....	15
Obr. 7: Vektorový diagram komplexní permitivity a elektrické indukce [11] .....	17
Obr. 8: Sériové náhradní zapojení s fázorovým diagramem [11] .....	18
Obr. 9: Paralelní náhradní zapojení s fázorovým diagramem [11] .....	18
Obr. 10: Schématické uspořádání třielektrodového systému [14] .....	19
Obr. 11: Závislost modulu pružnosti na teplotě u částečně krystalického polymeru ( $T_g$ – teplota skelného přechodu, $T_m$ – teplota tání, $T_f$ – teplota tečení) [17] .....	20
Obr. 12: Schéma zapojení při metodě Wheatstonova můstku při měření vnitřního odporu [7] .....	25
Obr. 13: Schématické zapojení voltampérové metody při měření vnitřního odporu [7]	25
Obr. 14: Schématické zapojení Scheringova můstku [29] .....	27
Obr. 15: Schématické zapojení Q-metru s dvuelektrodovým mikrometrickým konden- zátozem jako měřicím přípravkem [11] .....	27
Obr. 16: Vynesené teplotní závislosti ztrátového činitele $tg\delta$ pro různé sady vzorků ....	30
Obr. 17: Vynesené teplotní závislosti relativní permitivity $\epsilon'$ pro různé sady vzorků ....	31
Obr. 18: Vynesené teplotní závislosti vnitřní rezistivity $\rho_v$ pro různé sady vzorků .....	32
Obr. 19: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity $\epsilon'$ pro různé úrovně teplot – sada 1 .....	34
Obr. 20: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla $\epsilon''$ pro různé úrovně teplot – sada 1 .....	36
Obr. 21: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového čísla $\epsilon''$ pro různé úrovně teplot – sada 1 .....	36
Obr. 22: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele $tg\delta$ pro různé úrovně teplot – sada 1 .....	37
Obr. 23: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ pro různé úrovně teplot – sada 1 .....	37
Obr. 24: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity $\epsilon'$ měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 1 .....	38

Obr. 25: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 1 .....	39
Obr. 26: Horkovzdušný sterilizátor BMT Stericell 111 [30].....	40
Obr. 27: Impedanční analyzátor Tettex 2830/2831 [31] .....	41
Obr. 28: Měřicí přípravek Tettex 2914 [32] .....	42
Obr. 29: Měřicí sestava s širokopásmovým impedančním analyzátozem Novocontrol Technologies [33] .....	43
Obr. 30: Měřicí přístroj Agilent 4339B High Resistance Meter [35] .....	44
Obr. 31: Tříelektrodový měřicí systém Agilent 16008B Resistivity Cell [36].....	44

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Rozdělení vlhkosti vzduchu .....	21
Tab. 2: Průměrné hodnoty ztrátového činitele $tg\delta$ [-] pro různé teploty a sady vzorků..	29
Tab. 3: Průměrné hodnoty relativní permitivity $\varepsilon'$ [-] pro různé teploty a sady vzorků .	30
Tab. 4: Naměřené hodnoty vnitřní rezistivity $\rho_v$ [ $\Omega m$ ] pro různé teploty a sady vzorků	31
Tab. 5: Hodnoty vnitřního odporu $R_v$ a povrchového odporu $R_p$ včetně přepočtených hodnot vnitřních rezistivit $\rho_v$ a povrchových rezistivit $\rho_p$ pro různé sady vzorků.....	33
Tab. 6: Technické parametry horkovzdušného sterilizátoru BMT Stericell 111 [30] ....	40
Tab. 7: Technické parametry impedančního analyzátoru Tettex 2830/2831 [31] .....	41
Tab. 8: Technické parametry měřicího přípravku Tettex 2014 pro pevná dielektrika [32] .....	42
Tab. 9: Technické parametry širokopásmového impedančního analyzátoru Novocontrol Technologies [33] [34] .....	43
Tab. 10: Technické parametry přístroje Agilent 4339B High Resistance Meter [35] ....	44
Tab. 11: Technické parametry přístroje Agilent 16008B Resistivity Cell [36].....	45

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Tloušťky čtvercových vzorků .....	59
Příloha 2: Tloušťky kruhových vzorků .....	61
Příloha 3: Vynesené grafické závislosti relativní permitivity v závislosti na teplotě a kmitočtu – sady 2 až 7 .....	63
Příloha 4: Vynesené grafické závislosti ztrátového čísla v závislosti na teplotě a kmitočtu – sady 2 až 7 .....	66
Příloha 5: Vynesené grafické závislosti ztrátového činitele v závislosti na teplotě a kmitočtu – sady 2 až 7 .....	69
Příloha 6: Vynesené grafické závislosti ztrátového čísla v závislosti na teplotě a kmitočtu – detail sady 2 až 7 .....	72
Příloha 7: Vynesené grafické závislosti ztrátového činitele v závislosti na teplotě a kmitočtu – detail, sady 2 až 7 .....	75
Příloha 8: Porovnání měřených teplotních závislostí přístrojů Tettex a Novocontrol Technologies při kmitočtu 50 Hz.....	78



## Příloha 1: Tloušťky čtvercových vzorků

Tabulka 1: Naměřené tloušťky čtvercových vzorků s vypočtenou hodnotou aritmetického průměru a výběrové směrodatné odchylky – 1. část

Sada vzorků	Odlitek	Označení vzorku	d [mm]										$\bar{x}$ [mm]	s [mm]
1	1	1-A	1,918	1,855	1,847	1,947	1,953	1,955	1,965	2,019	1,915	1,930	0,054	
	2	1-B	1,971	1,950	2,005	2,016	2,005	2,030	2,019	1,990	1,921	1,990	0,036	
	3	1-C	2,329	2,258	2,315	2,262	2,334	2,320	2,299	2,304	2,350	2,308	0,031	
	4		2,240	2,217	2,031	2,112	2,203	2,200	2,176	2,216	2,221	2,180	0,067	
	5		1,953	2,072	2,045	2,000	2,032	1,975	1,971	1,982	2,373	2,045	0,129	
	6		2,545	2,252	2,096	2,080	2,199	2,184	2,233	2,132	2,215	2,215	0,137	
	7		2,352	2,179	2,153	2,233	2,240	2,293	2,244	2,213	2,229	2,237	0,059	
	8	1-D	1,948	1,893	1,927	1,937	1,920	1,926	1,928	1,939	1,918	1,926	0,016	
	9	1-E	2,212	2,110	2,056	2,039	2,026	2,054	2,071	2,063	2,027	2,073	0,058	
2	1		1,884	1,940	1,953	1,916	1,839	1,863	1,857	1,877	1,830	1,884	0,043	
	2		1,893	1,757	1,858	1,929	1,879	1,900	1,854	1,910	1,864	1,872	0,050	
	3	2-A	1,871	1,924	1,978	1,909	1,912	1,933	1,895	1,929	1,906	1,917	0,030	
	4	2-B	1,790	1,895	1,869	1,841	1,839	1,876	1,830	1,853	1,806	1,844	0,033	
	5	2-C	1,878	1,896	1,867	1,782	1,877	1,859	1,826	1,892	1,893	1,863	0,037	
	6	2-D	1,890	1,883	1,856	1,874	1,886	1,886	1,887	1,870	1,896	1,881	0,012	
	7	2-E	1,817	1,729	1,835	1,830	1,775	1,822	1,784	1,756	1,738	1,787	0,041	
	8		2,029	2,033	1,874	1,954	2,003	2,004	1,928	1,972	2,017	1,979	0,053	
	9		2,043	2,102	2,082	2,017	2,118	2,074	2,085	2,216	2,171	2,101	0,061	
	10		1,978	1,915	1,815	1,829	1,810	1,797	1,794	1,819	1,832	1,843	0,062	
3	1	3-A	1,848	1,931	1,808	1,818	1,861	1,928	1,862	1,869	1,800	1,858	0,047	
	2		1,967	1,890	1,885	1,992	2,201	1,962	1,905	1,946	1,995	1,971	0,095	
	3	3-B	1,959	1,916	1,911	1,970	1,941	1,942	1,922	1,938	1,952	1,939	0,020	
	4		2,043	1,829	1,830	1,990	1,963	1,991	1,894	2,032	1,972	1,949	0,080	
	5		1,975	1,988	2,046	1,971	2,091	2,048	2,112	2,038	2,021	2,032	0,049	
	6		1,911	1,927	1,824	1,860	1,796	1,814	1,801	1,821	1,795	1,839	0,050	
	7	3-C	1,795	1,905	1,895	1,834	1,898	1,890	1,920	1,901	1,842	1,876	0,042	
	8	3-D	1,895	1,895	1,879	1,838	1,875	1,867	1,874	1,890	1,877	1,877	0,018	
	9	3-E	1,757	1,865	1,818	1,775	1,779	1,733	1,799	1,837	1,783	1,794	0,041	
4	1		1,886	1,845	1,975	1,977	1,835	1,915	1,877	1,817	1,875	1,889	0,057	
	2	4-A	2,033	1,989	2,003	1,979	2,058	2,076	2,072	2,026	2,026	2,029	0,035	
	3	4-B	1,961	1,927	1,900	1,884	1,921	1,887	1,923	1,934	1,937	1,919	0,025	
	4	4-C	1,909	1,867	1,840	1,871	1,812	1,846	1,800	1,808	1,821	1,842	0,036	
	5	4-D	1,913	1,969	1,973	1,950	1,954	1,953	1,972	1,942	1,926	1,950	0,021	
	6		1,934	1,779	1,882	2,002	1,940	1,954	1,953	2,011	1,911	1,930	0,069	
	7		2,001	2,036	1,983	1,946	1,866	1,901	1,943	1,890	1,925	1,943	0,055	
	8	4-E	2,018	2,027	2,046	2,084	2,139	2,103	2,072	2,108	2,119	2,080	0,042	
	9		1,828	1,880	2,108	2,033	1,994	2,027	2,001	1,984	1,871	1,970	0,091	

Tabulka 2: Naměřené tloušťky čtvercových vzorků s vypočtenou hodnotou aritmetického průměru a výběrové směrodatné odchylky – 2. část

Sada vzorků	Odlitek	Označení vzorku	d [mm]										$\bar{x}$ [mm]	s [mm]
5	1	5-A	1,827	1,797	1,827	1,771	1,778	1,781	1,804	1,753	1,764	1,789	0,026	
	2		2,178	1,917	1,765	1,979	1,983	1,956	1,822	2,067	2,053	1,969	0,126	
	3	5-B	1,675	1,789	1,787	1,766	1,737	1,767	1,752	1,689	1,708	1,741	0,042	
	4		1,954	2,014	2,125	2,259	2,092	2,192	2,095	2,078	1,969	2,086	0,099	
	5		2,010	2,063	1,977	1,895	1,899	1,892	1,973	1,941	1,965	1,957	0,058	
	6		1,953	2,021	2,122	2,139	2,078	2,127	2,107	2,079	1,967	2,066	0,070	
	7	5-C	2,074	2,104	2,122	2,073	2,129	2,101	2,203	2,090	2,088	2,109	0,040	
	8	5-D	1,816	1,860	1,850	1,738	1,808	1,776	1,838	1,798	1,827	1,812	0,038	
	9		2,004	1,939	1,838	1,913	1,810	1,805	1,836	1,905	1,871	1,880	0,066	
	10	5-E	1,795	1,746	1,796	1,760	1,775	1,761	1,809	1,792	1,754	1,776	0,022	
6	1		1,852	1,838	1,742	1,887	1,850	1,847	1,809	1,889	1,754	1,830	0,052	
	2	6-A	1,907	1,913	1,889	1,886	1,926	1,918	1,909	1,900	1,920	1,908	0,014	
	3	6-B	1,937	1,900	1,835	1,929	1,922	1,880	1,956	1,918	1,948	1,914	0,038	
	4		1,986	2,009	1,901	1,829	1,826	1,846	1,842	1,823	1,929	1,888	0,072	
	5		2,193	2,048	2,059	2,079	2,111	2,124	2,086	2,042	2,124	2,096	0,048	
	6		2,128	2,097	1,934	1,983	2,042	1,965	2,063	2,112	2,044	2,041	0,068	
	7	6-C	1,790	1,823	1,855	1,755	1,808	1,813	1,780	1,766	1,825	1,802	0,032	
	8	6-D	1,810	1,855	1,869	1,853	1,832	1,825	1,849	1,855	1,828	1,842	0,019	
	9	6-E	1,895	1,866	1,838	1,814	1,884	1,877	1,860	1,870	1,902	1,867	0,028	
	10		2,042	1,859	1,888	2,046	1,920	2,007	1,934	1,828	1,891	1,935	0,079	
7	1		2,196	2,055	2,048	2,170	2,217	2,214	2,254	2,158	2,092	2,156	0,075	
	2		2,000	1,876	1,972	2,064	1,886	1,942	1,935	1,870	1,891	1,937	0,065	
	3	7-A	1,941	1,954	1,977	1,971	1,978	1,981	1,968	1,964	1,977	1,968	0,013	
	4	7-B	1,861	1,880	1,969	1,988	1,973	1,998	1,962	1,914	1,960	1,945	0,048	
	5	7-C	1,713	1,842	1,915	1,818	1,737	1,788	1,739	1,742	1,766	1,784	0,064	
	6	7-D	1,965	2,090	2,155	2,057	2,087	2,088	2,149	2,008	2,044	2,071	0,061	
	7		2,027	2,188	2,025	1,863	2,059	2,107	2,028	1,965	2,115	2,042	0,093	
	8		1,913	2,044	2,154	1,950	2,048	1,958	2,040	2,097	2,014	2,024	0,076	
	9	7-E	1,860	1,858	1,860	1,826	1,789	1,796	1,843	1,800	1,803	1,826	0,030	

## Příloha 2: Tloušťky kruhových vzorků

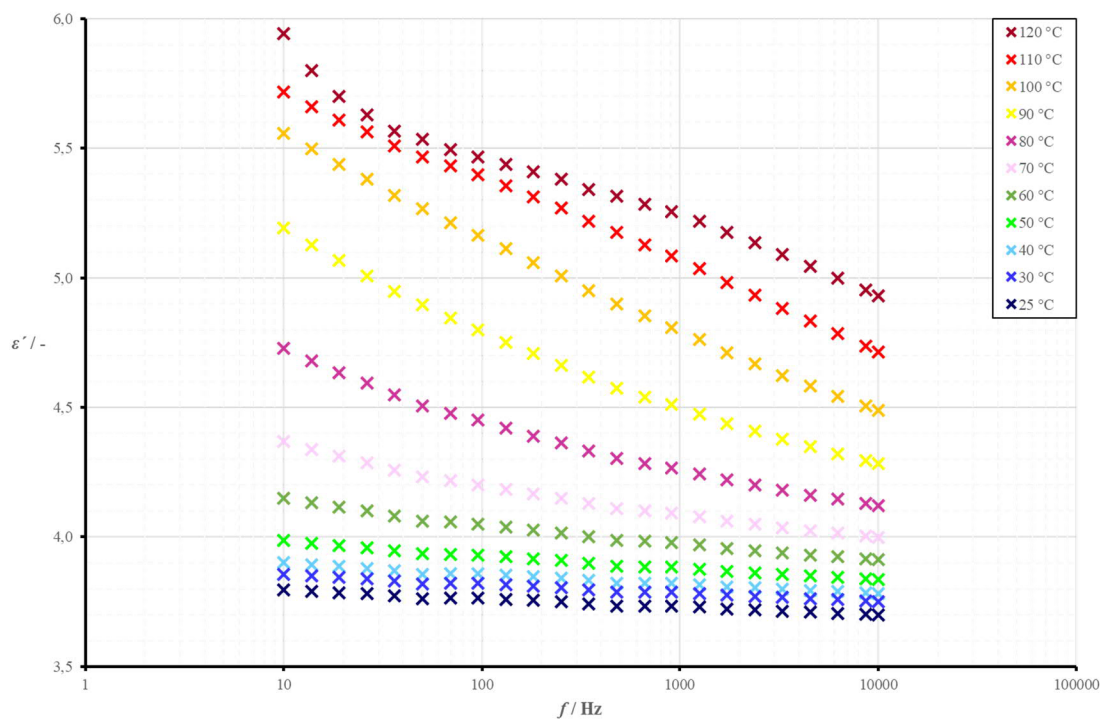
Tabulka 3: Naměřené tloušťky kruhových vzorků s vypočtenou hodnotou aritmetického průměru a výběrové směrodatné odchylky – 1. část

Sada vzorků	Odlitek	Označení vzorku	d [mm]										$\bar{x}$ [mm]	s [mm]
1	1		1,945	1,918	1,894	1,929	1,922	1,937	1,895	1,911	1,938	1,921	0,018	
	2	1-A	1,945	1,924	1,928	1,939	1,929	1,931	1,948	1,928	1,924	1,933	0,009	
	3	1-B	1,969	1,966	1,942	1,949	1,962	1,973	1,963	1,945	1,954	1,958	0,011	
	4	1-C	1,905	1,926	1,911	1,909	1,916	1,921	1,900	1,907	1,920	1,913	0,009	
	5	1-D	1,914	1,934	1,927	1,917	1,930	1,926	1,932	1,927	1,917	1,925	0,007	
	6		1,894	1,900	1,927	1,923	1,913	1,919	1,890	1,897	1,924	1,910	0,014	
	7		1,955	1,971	1,954	1,933	1,954	1,952	1,970	1,965	1,948	1,956	0,012	
	8		1,933	1,900	1,906	1,937	1,915	1,884	1,911	1,941	1,925	1,917	0,019	
	9	1-E	1,868	1,859	1,868	1,855	1,861	1,860	1,867	1,857	1,855	1,861	0,005	
	10		1,875	1,897	1,883	1,860	1,880	1,901	1,894	1,866	1,858	1,879	0,016	
2	1		1,928	1,886	1,890	1,908	1,913	1,918	1,892	1,900	1,914	1,905	0,014	
	2	2-A	1,844	1,856	1,842	1,826	1,840	1,852	1,852	1,834	1,825	1,841	0,011	
	3		1,798	1,751	1,774	1,803	1,779	1,775	1,800	1,787	1,760	1,781	0,018	
	4		1,856	1,880	1,894	1,869	1,878	1,898	1,867	1,848	1,884	1,875	0,017	
	5		1,870	1,808	1,854	1,884	1,862	1,841	1,879	1,873	1,836	1,856	0,024	
	6	2-B	1,901	1,894	1,896	1,896	1,898	1,896	1,898	1,907	1,895	1,898	0,004	
	7	2-C	1,786	1,794	1,802	1,800	1,789	1,779	1,797	1,792	1,792	1,792	0,007	
	8	2-D	1,753	1,735	1,754	1,772	1,752	1,741	1,734	1,759	1,770	1,752	0,014	
	9	2-E	1,851	1,836	1,834	1,845	1,837	1,840	1,847	1,831	1,833	1,839	0,007	
	10		1,984	1,956	1,977	1,995	1,980	1,963	1,960	1,995	1,991	1,978	0,015	
3	1		1,846	1,888	1,923	1,900	1,887	1,869	1,877	1,911	1,899	1,889	0,023	
	2	3-A	1,927	1,928	1,927	1,927	1,928	1,928	1,939	1,931	1,929	1,929	0,004	
	3		1,817	1,845	1,867	1,855	1,842	1,833	1,840	1,859	1,855	1,846	0,015	
	4	3-B	1,834	1,837	1,817	1,819	1,825	1,825	1,844	1,828	1,810	1,827	0,011	
	5	3-C	1,868	1,868	1,867	1,870	1,873	1,864	1,874	1,872	1,868	1,869	0,003	
	6		1,866	1,888	1,874	1,850	1,871	1,889	1,884	1,839	1,857	1,869	0,017	
	7	3-D	1,818	1,829	1,829	1,836	1,828	1,821	1,828	1,834	1,829	1,828	0,006	
	8		1,765	1,754	1,764	1,754	1,749	1,777	1,739	1,741	1,776	1,758	0,014	
	9	3-E	1,780	1,795	1,797	1,775	1,787	1,791	1,790	1,790	1,789	1,788	0,007	
	10		1,782	1,794	1,782	1,761	1,780	1,799	1,799	1,763	1,759	1,780	0,016	
4	1		2,051	2,026	2,005	2,027	2,030	2,037	2,016	2,013	2,039	2,027	0,014	
	2	4-A	2,033	2,022	2,018	2,003	2,023	2,023	2,034	2,010	1,997	2,018	0,013	
	3	4-B	1,935	1,928	1,907	1,932	1,926	1,928	1,919	1,915	1,928	1,924	0,009	
	4		1,757	1,774	1,752	1,744	1,766	1,770	1,778	1,738	1,742	1,758	0,015	
	5	4-C	1,995	1,996	2,001	1,996	2,000	1,994	2,002	2,000	1,997	1,998	0,003	
	6		1,968	1,958	1,991	1,991	1,980	1,947	1,971	2,004	1,975	1,976	0,018	
	7		1,641	1,705	1,665	1,710	1,689	1,678	1,705	1,692	1,656	1,682	0,024	
	8	4-D	1,962	1,951	1,950	1,952	1,953	1,948	1,952	1,961	1,946	1,953	0,005	
	9		1,805	1,775	1,801	1,819	1,802	1,787	1,791	1,807	1,811	1,800	0,013	
	10	4-E	2,001	1,998	1,998	2,006	2,002	1,998	1,988	2,002	2,007	2,000	0,006	

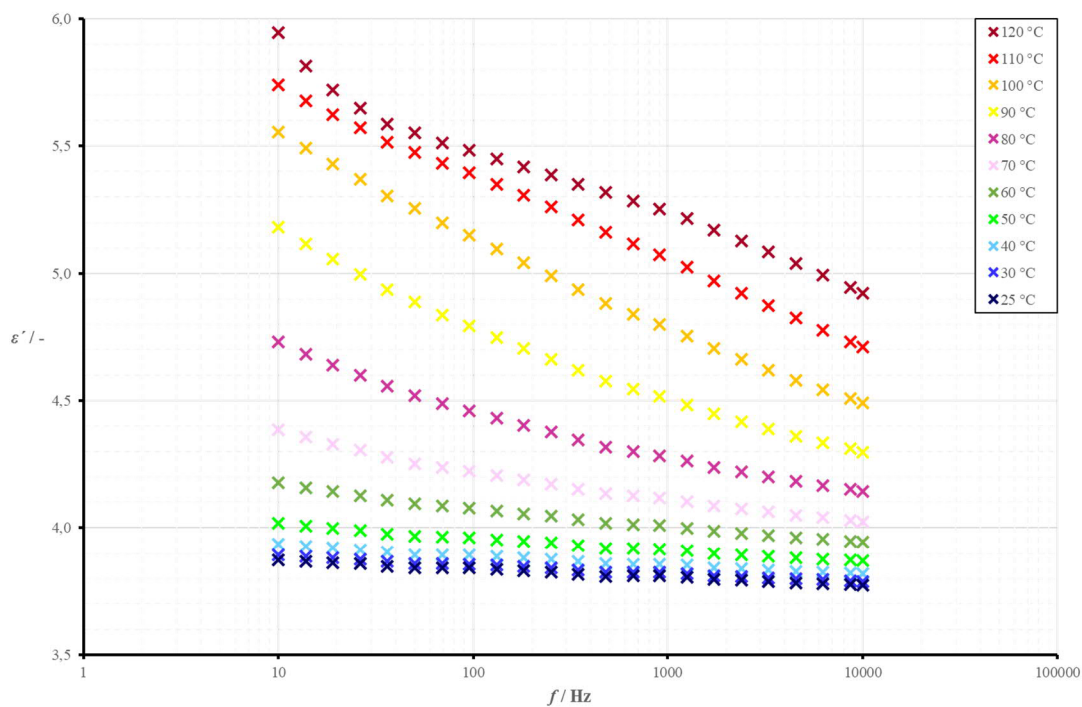
Tabulka 4: Naměřené tloušťky kruhových vzorků s vypočtenou hodnotou aritmetického průměru a výběrové směrodatné odchylky – 2. část

Sada vzorků	Odlitek	Označení vzorku	d [mm]										$\bar{x}$ [mm]	s [mm]
5	1		1,806	1,764	1,773	1,799	1,784	1,784	1,766	1,778	1,813	1,785	0,017	
	2		2,178	2,155	2,179	2,142	2,167	2,190	2,167	2,136	2,159	2,164	0,018	
	3	5-A	2,149	2,154	2,152	2,183	2,157	2,158	2,163	2,162	2,153	2,159	0,010	
	4	5-B	2,123	2,108	2,121	2,128	2,121	2,117	2,102	2,130	2,124	2,119	0,009	
	5	5-C	1,851	1,873	1,855	1,831	1,843	1,846	1,861	1,837	1,840	1,849	0,013	
	6		2,179	2,185	2,167	2,150	2,174	2,173	2,196	2,176	2,149	2,172	0,015	
	7	5-D	2,186	2,161	2,158	2,174	2,171	2,168	2,179	2,176	2,162	2,171	0,009	
	8	5-E	2,092	2,100	2,099	2,096	2,102	2,107	2,088	2,092	2,093	2,097	0,006	
	9		2,092	2,108	2,136	2,132	2,124	2,106	2,124	2,138	2,112	2,119	0,016	
	10		1,747	1,797	1,813	1,770	1,782	1,819	1,763	1,743	1,806	1,782	0,028	
6	1	6-A	1,977	1,962	1,936	1,946	1,958	1,963	1,964	1,950	1,936	1,955	0,014	
	2	6-B	2,058	2,070	2,080	2,073	2,070	2,076	2,061	2,059	2,084	2,070	0,009	
	3		1,837	1,797	1,820	1,861	1,830	1,802	1,816	1,853	1,843	1,829	0,022	
	4		1,871	1,853	1,896	1,916	1,879	1,843	1,896	1,916	1,868	1,882	0,026	
	5		2,095	2,082	2,053	2,076	2,074	2,079	2,088	2,064	2,067	2,075	0,013	
	6	6-C	1,957	1,949	1,945	1,948	1,951	1,953	1,954	1,949	1,947	1,950	0,004	
	7	6-D	1,897	1,907	1,904	1,881	1,897	1,903	1,891	1,892	1,900	1,897	0,008	
	8	6-E	1,901	1,894	1,874	1,886	1,890	1,905	1,873	1,899	1,870	1,888	0,013	
	9		2,045	2,017	1,996	2,010	2,022	2,034	2,028	2,007	2,007	2,018	0,015	
	10		2,083	2,099	2,114	2,084	2,095	2,112	2,091	2,071	2,103	2,095	0,014	
7	1		1,852	1,900	1,924	1,902	1,896	1,916	1,872	1,882	1,910	1,895	0,023	
	2		1,976	2,014	2,019	1,988	2,000	2,004	1,954	2,002	2,029	1,998	0,023	
	3		1,905	1,929	1,918	1,878	1,913	1,925	1,896	1,896	1,924	1,909	0,017	
	4		2,203	2,183	2,174	2,184	2,188	2,192	2,206	2,172	2,172	2,186	0,013	
	5	7-A	2,154	2,155	2,145	2,149	2,155	2,149	2,159	2,151	2,147	2,152	0,005	
	6	7-B	2,119	2,118	2,116	2,114	2,117	2,118	2,119	2,113	2,112	2,116	0,003	
	7	7-C	2,144	2,128	2,118	2,130	2,133	2,136	2,132	2,127	2,125	2,130	0,007	
	8	7-D	2,188	2,190	2,205	2,197	2,197	2,194	2,180	2,186	2,214	2,195	0,010	
	9		1,960	1,909	1,929	1,945	1,938	1,954	1,934	1,931	1,933	1,937	0,015	
	10	7-E	2,209	2,207	2,187	2,196	2,202	2,192	2,215	2,197	2,176	2,198	0,012	

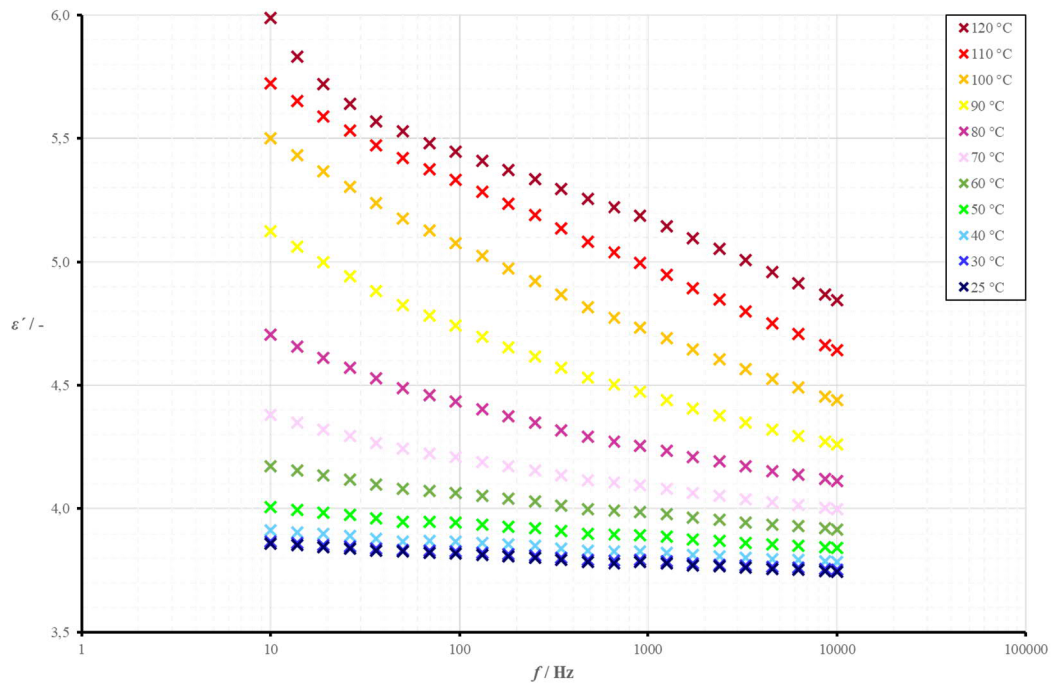
**Příloha 3: Vynesené grafické závislosti relativní permitivity v závislosti na teplotě a kmitočtu – sady 2 až 7**



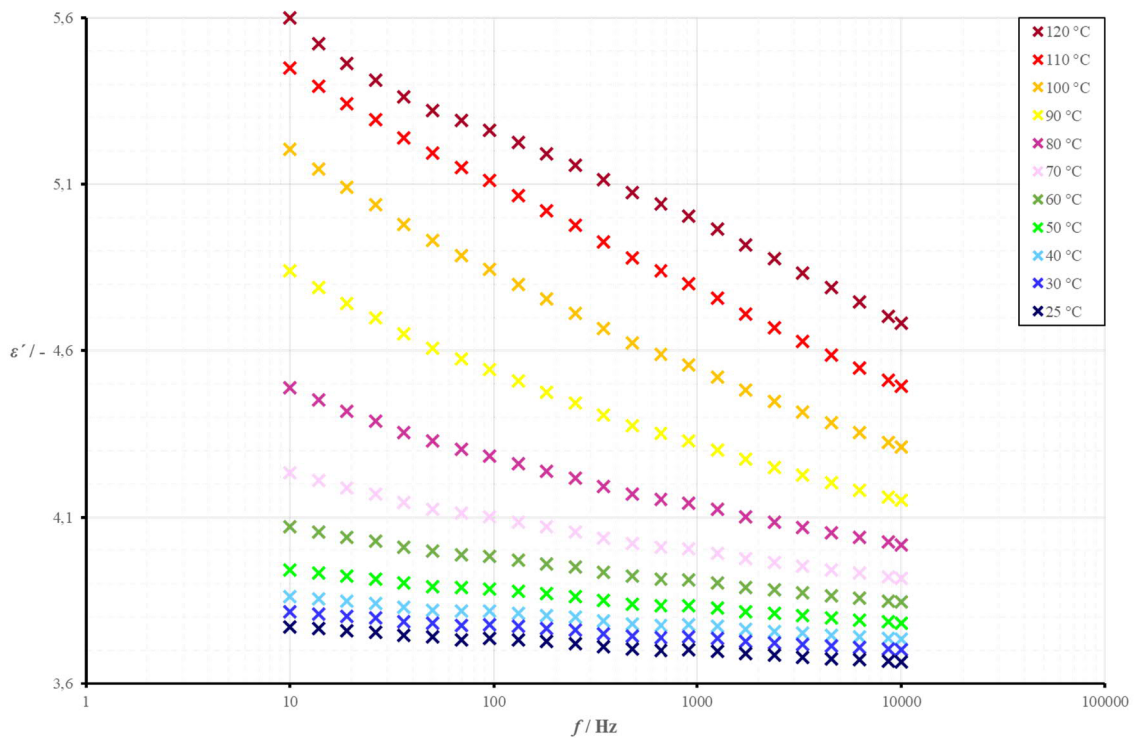
Obrázek 1: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity  $\varepsilon'$  pro různé úrovně teplot – sada 2



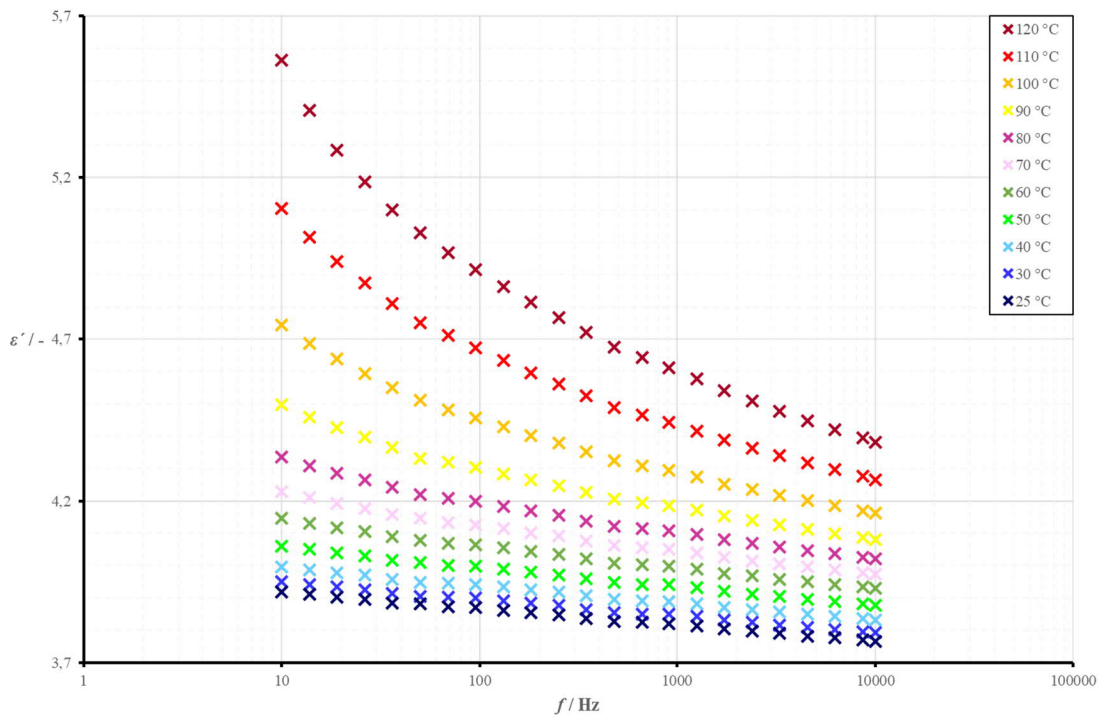
Obrázek 2: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity  $\varepsilon'$  pro různé úrovně teplot – sada 3



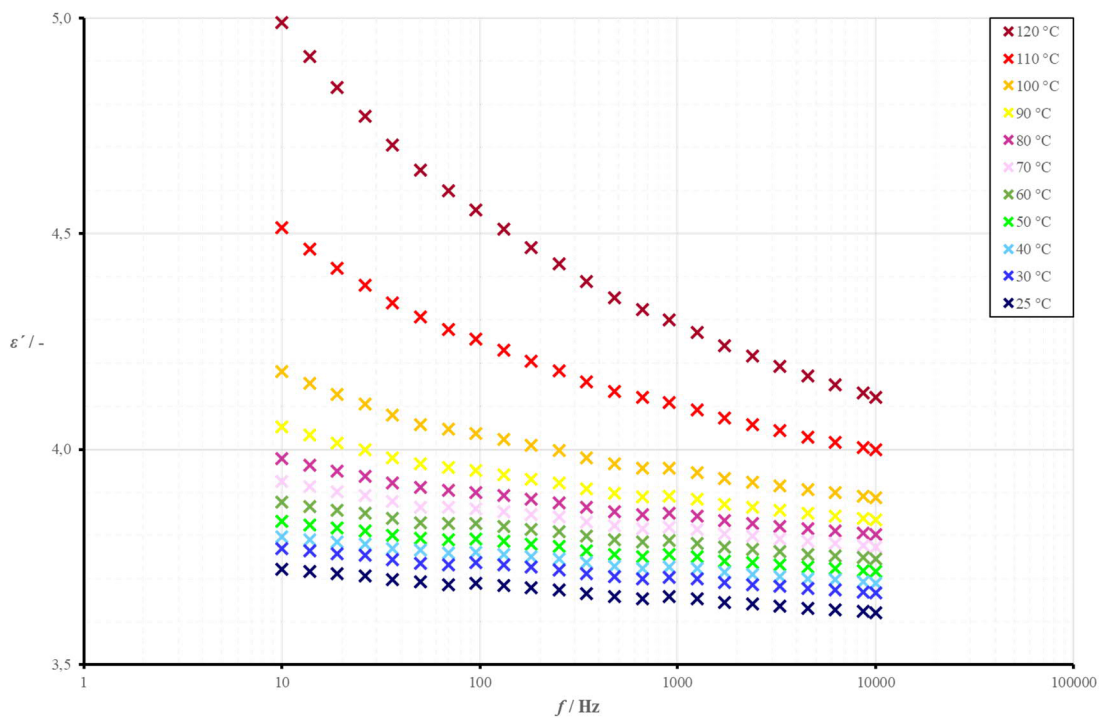
Obrázek 3: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity  $\epsilon'$  pro různé úrovně teplot – sada 4



Obrázek 4: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity  $\epsilon'$  pro různé úrovně teplot – sada 5



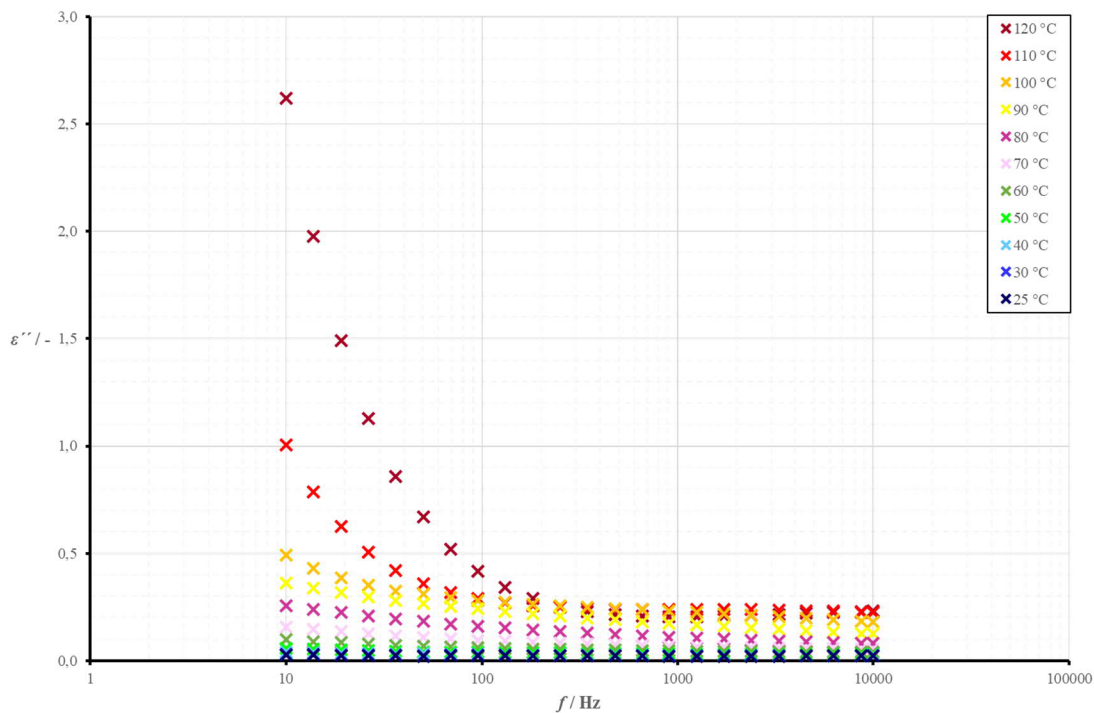
Obrázek 5: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity  $\epsilon'$  pro různé úrovně teplot – sada 6



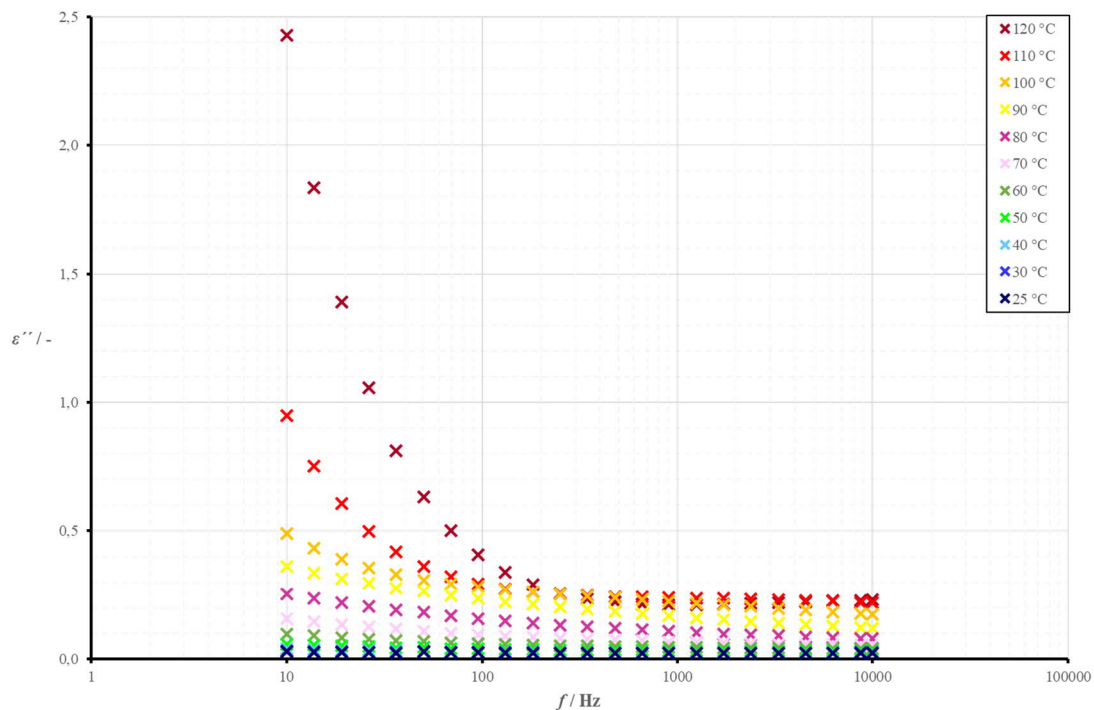
Obrázek 6: Vynesené frekvenční závislosti relativní permitivity  $\epsilon'$  pro různé úrovně teplot – sada 7



**Příloha 4: Vynesené grafické závislosti ztrátového čísla v závislosti na teplotě a kmitočtu – sady 2 až 7**

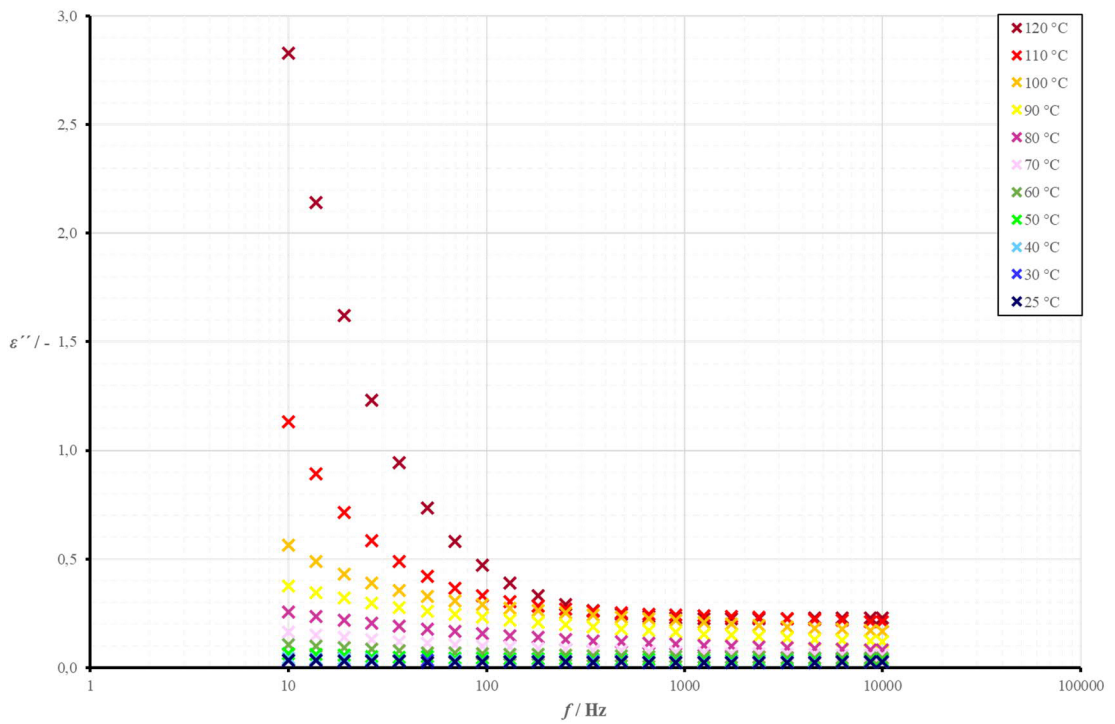


Obrázek 7: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 2

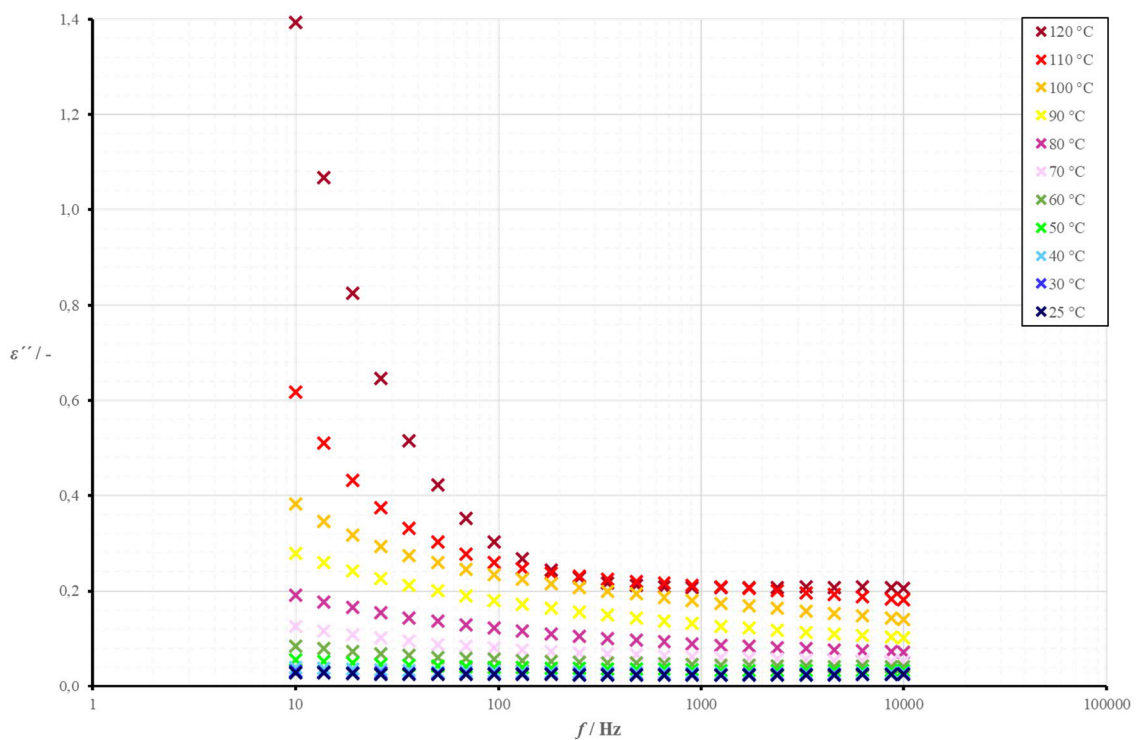


Obrázek 8: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 3

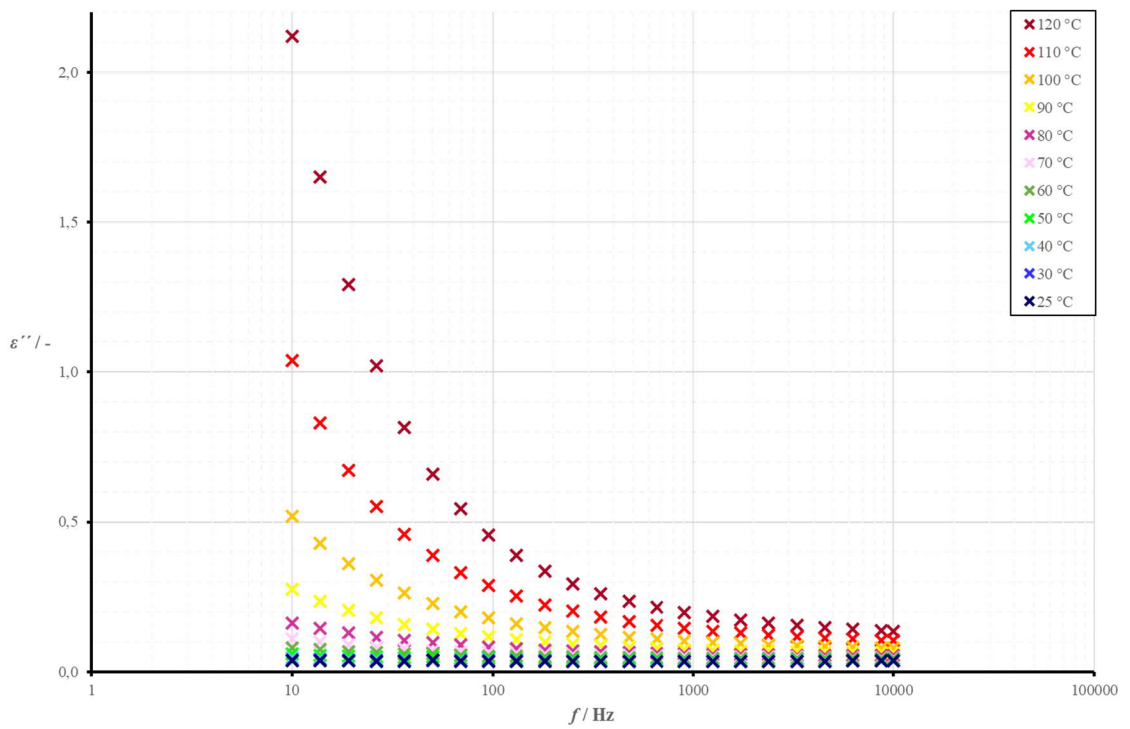




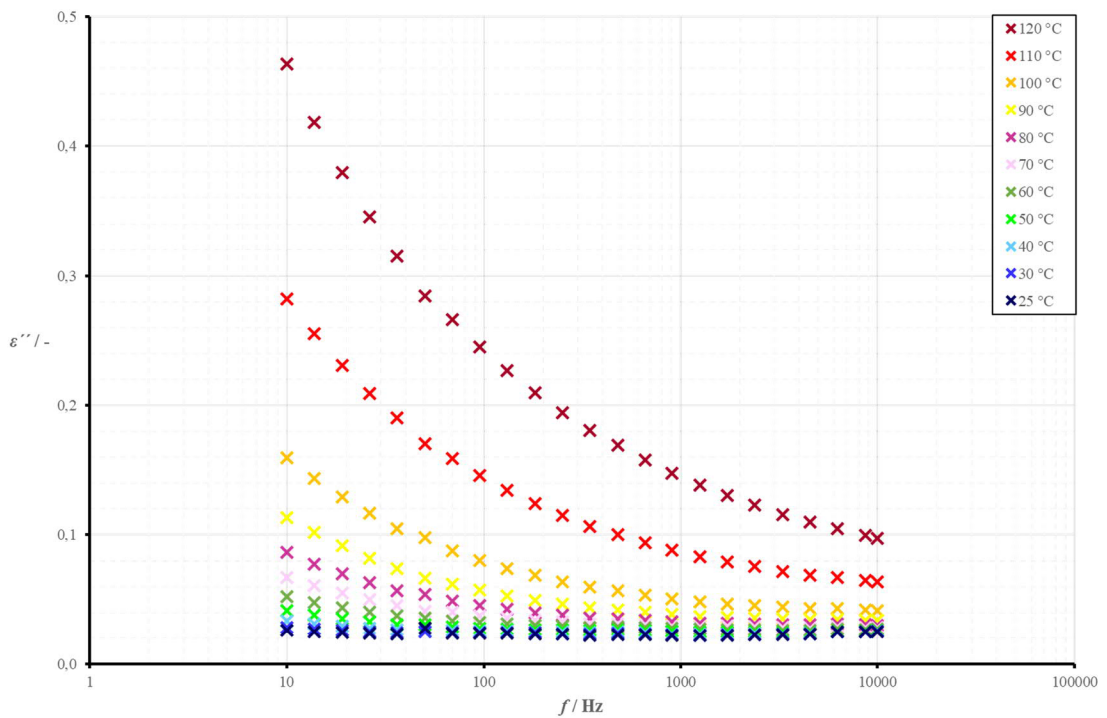
Obrázek 9: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 4



Obrázek 10: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 5

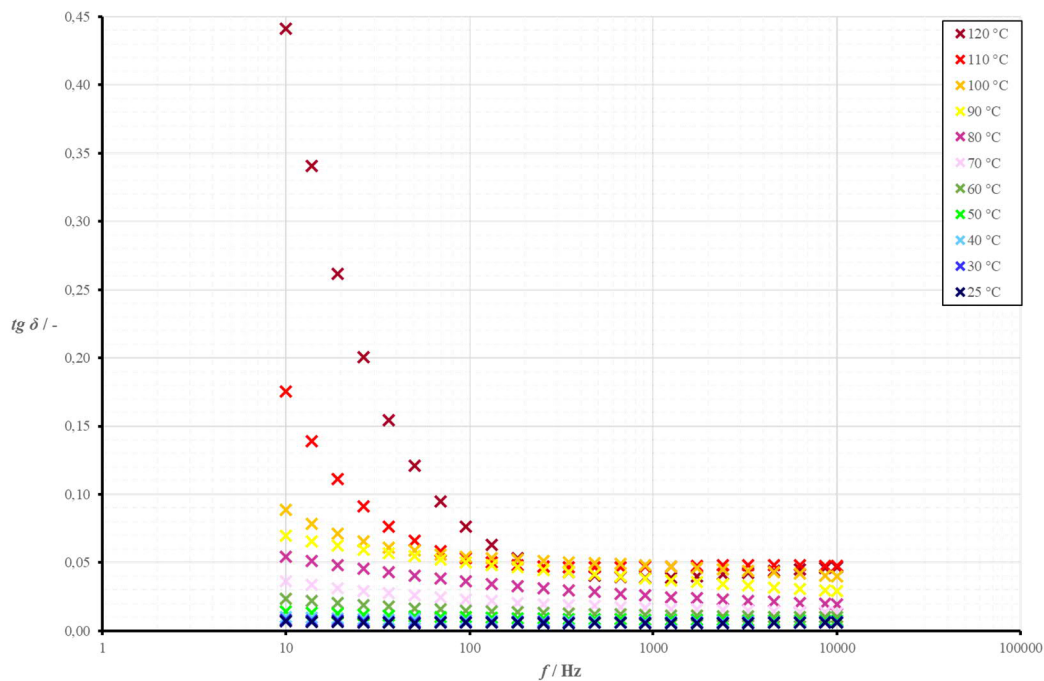


Obrázek 11: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 6

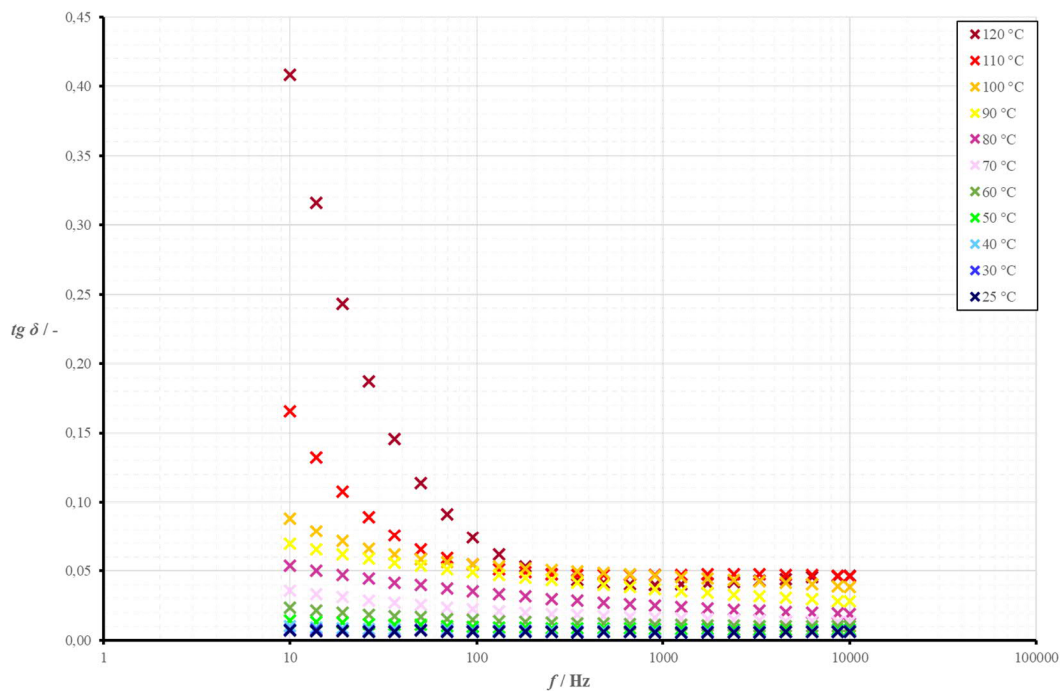


Obrázek 12: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového čísla  $\varepsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 7

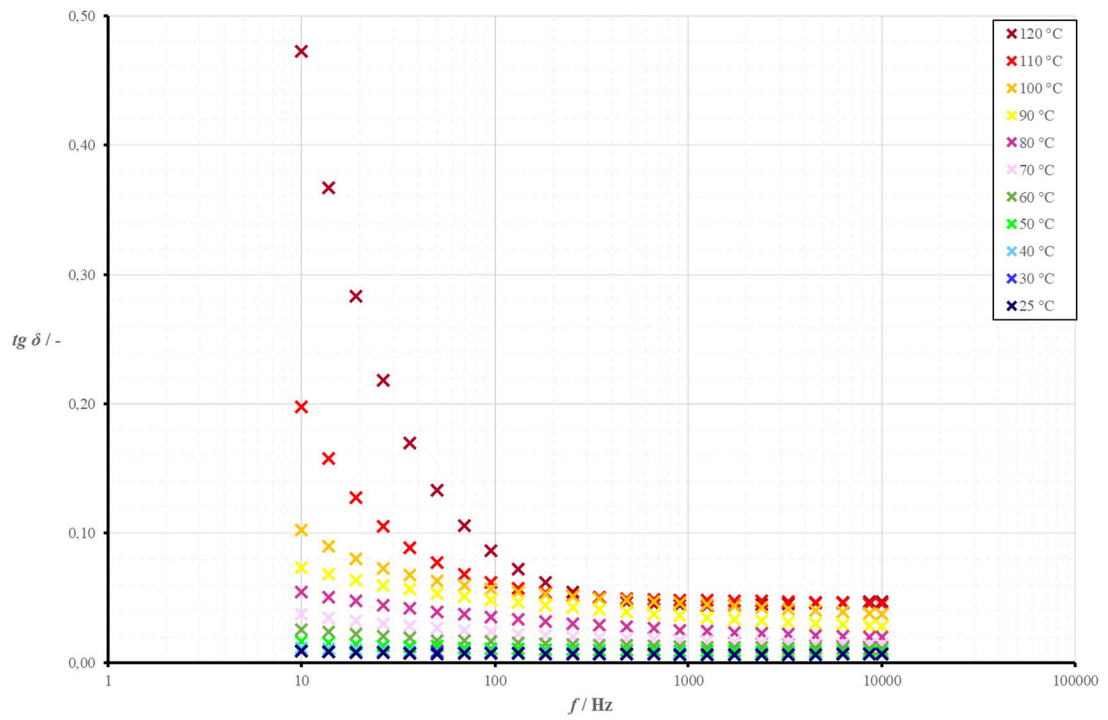
**Příloha 5: Vynesené grafické závislosti ztrátového činitele v závislosti na teplotě a kmitočtu – sady 2 až 7**



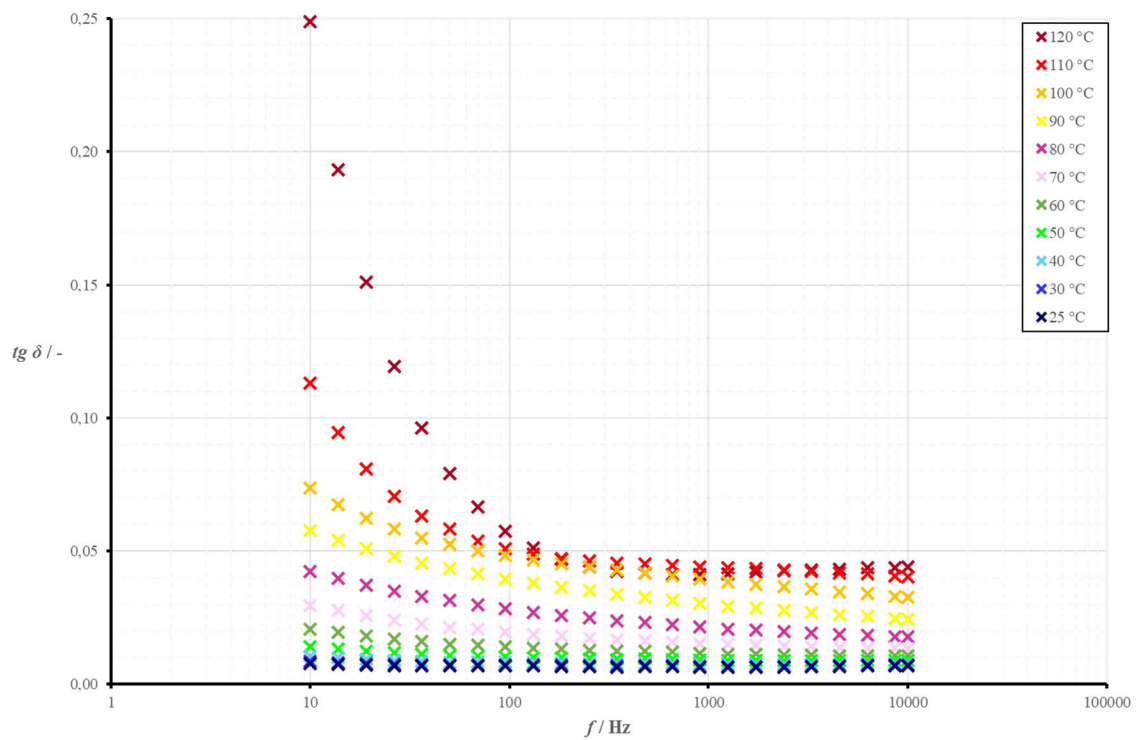
Obrázek 13: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele  $tg \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 2



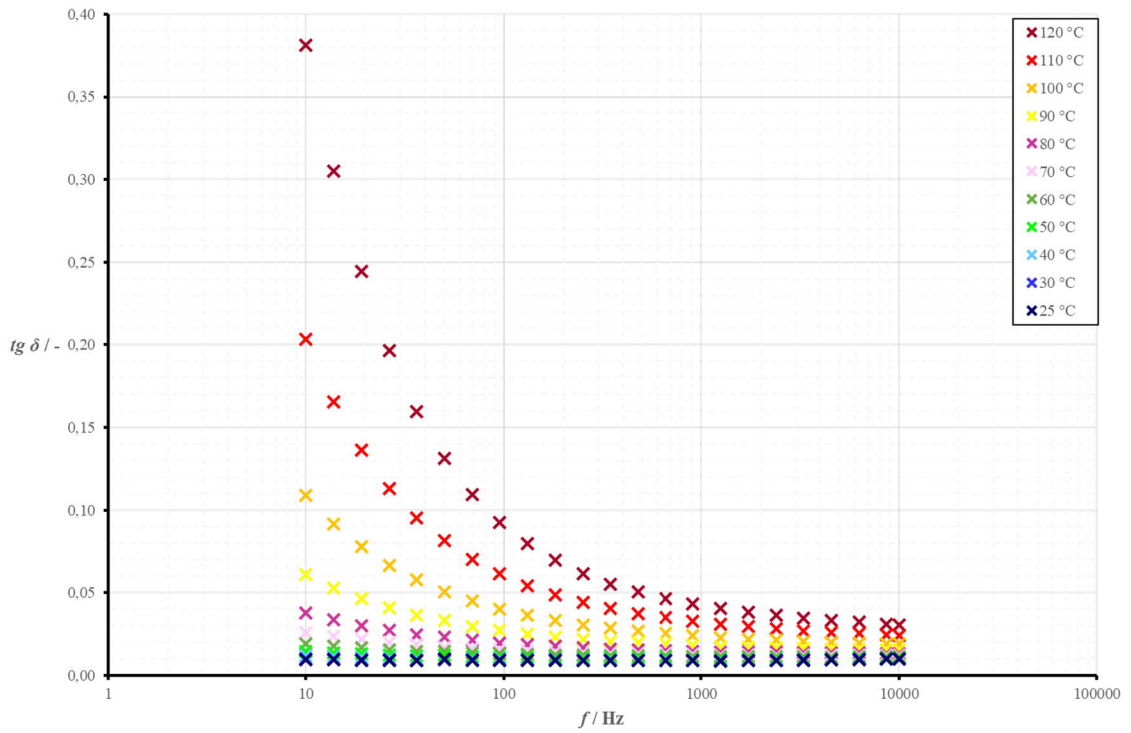
Obrázek 14: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele  $tg \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 3



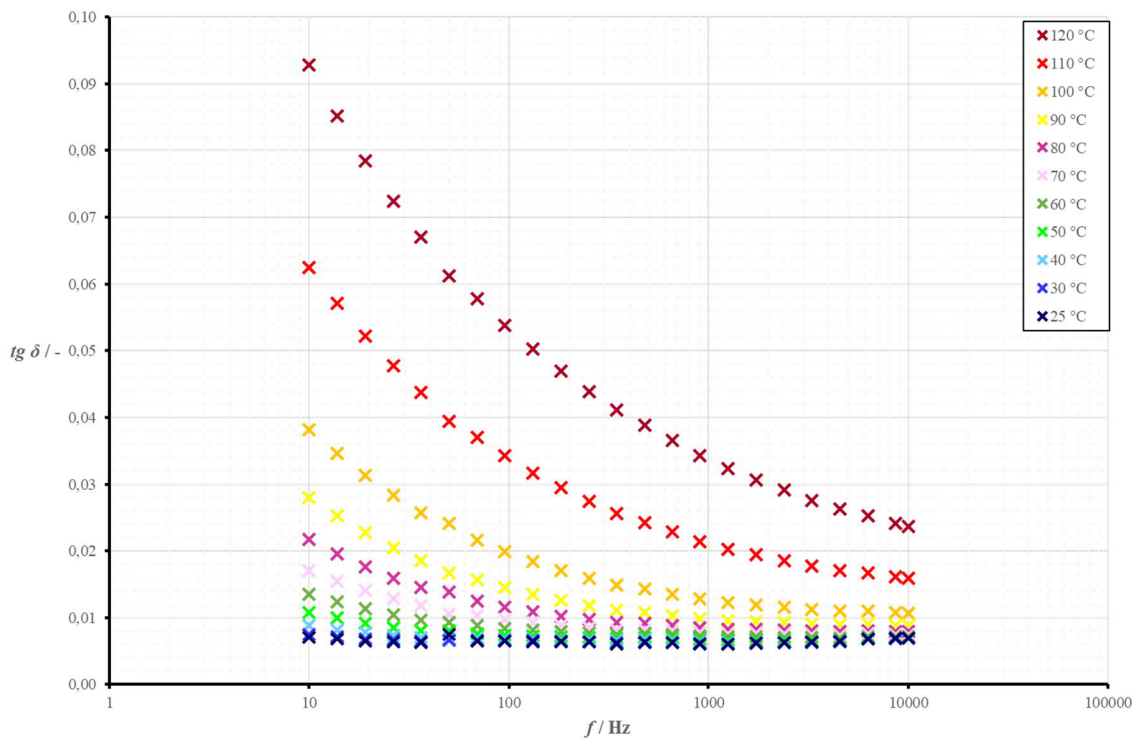
Obrázek 15: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé úrovně teplot – sada 4



Obrázek 16: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé úrovně teplot – sada 5



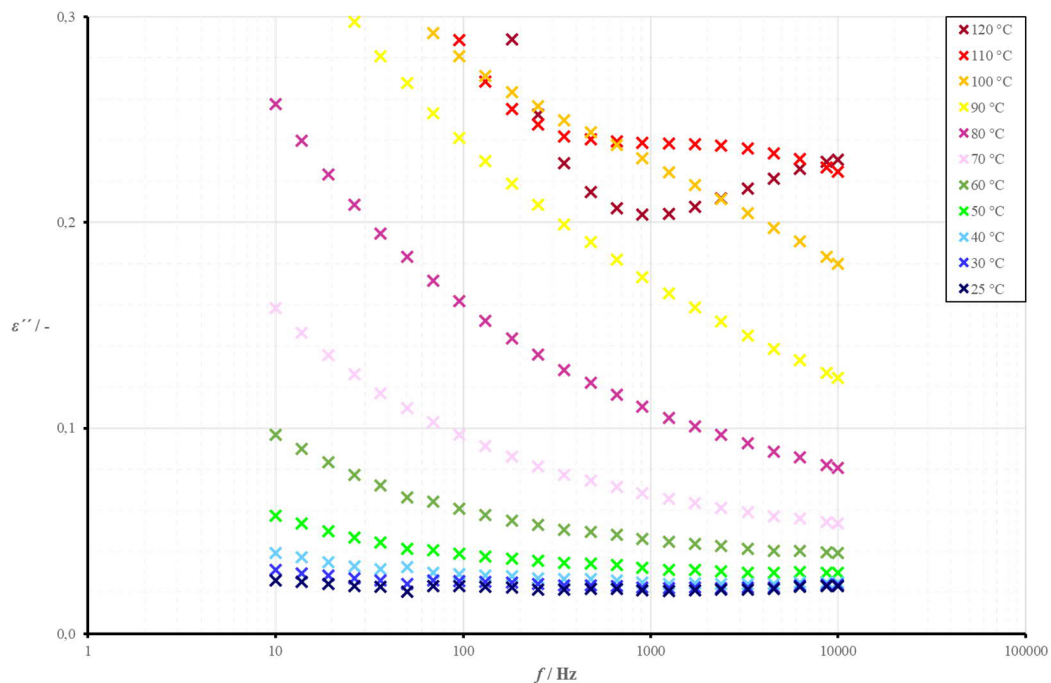
Obrázek 17: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 6



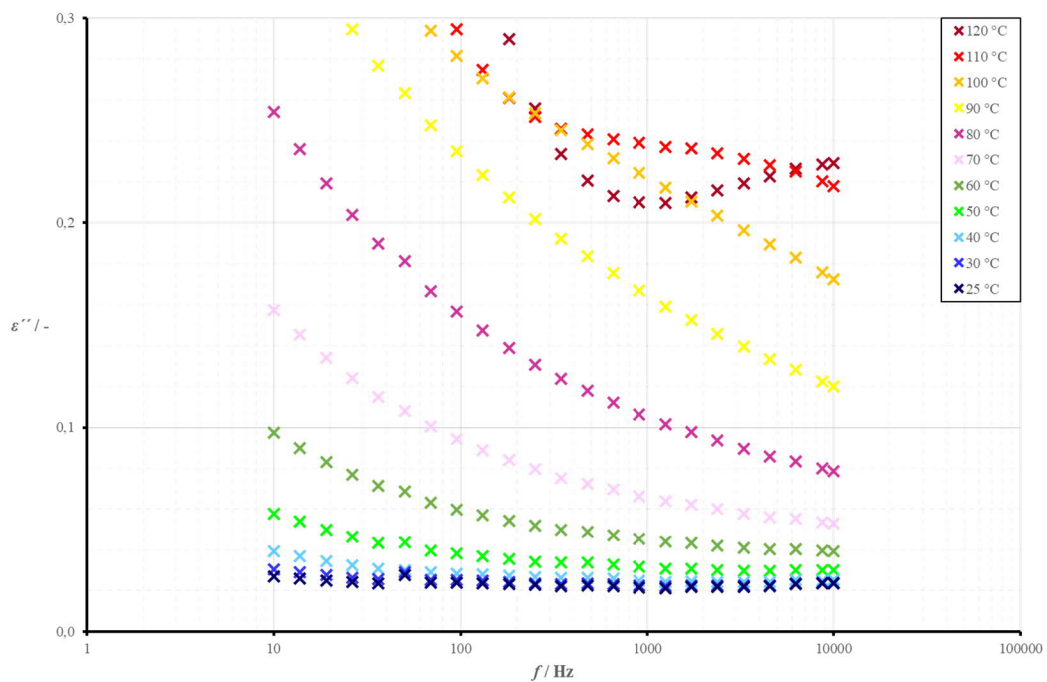
Obrázek 18: Vynesené frekvenční závislosti ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 7



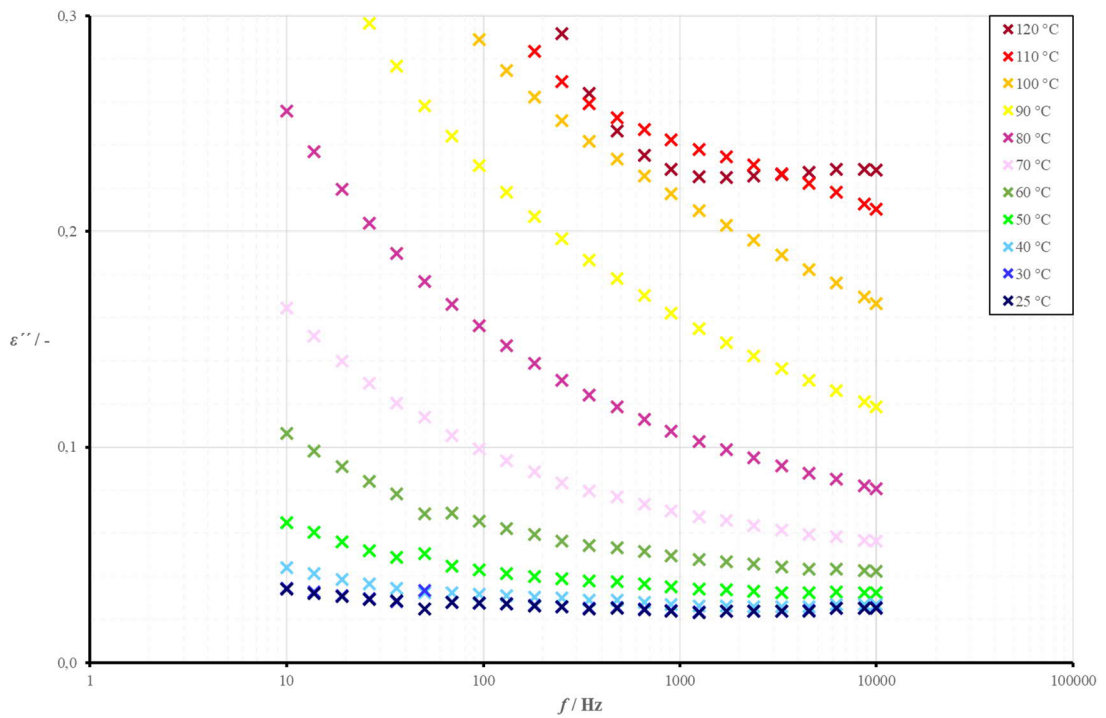
**Příloha 6: Vynesené grafické závislosti ztrátového čísla v závislosti na teplotě a kmitočtu – detail sady 2 až 7**



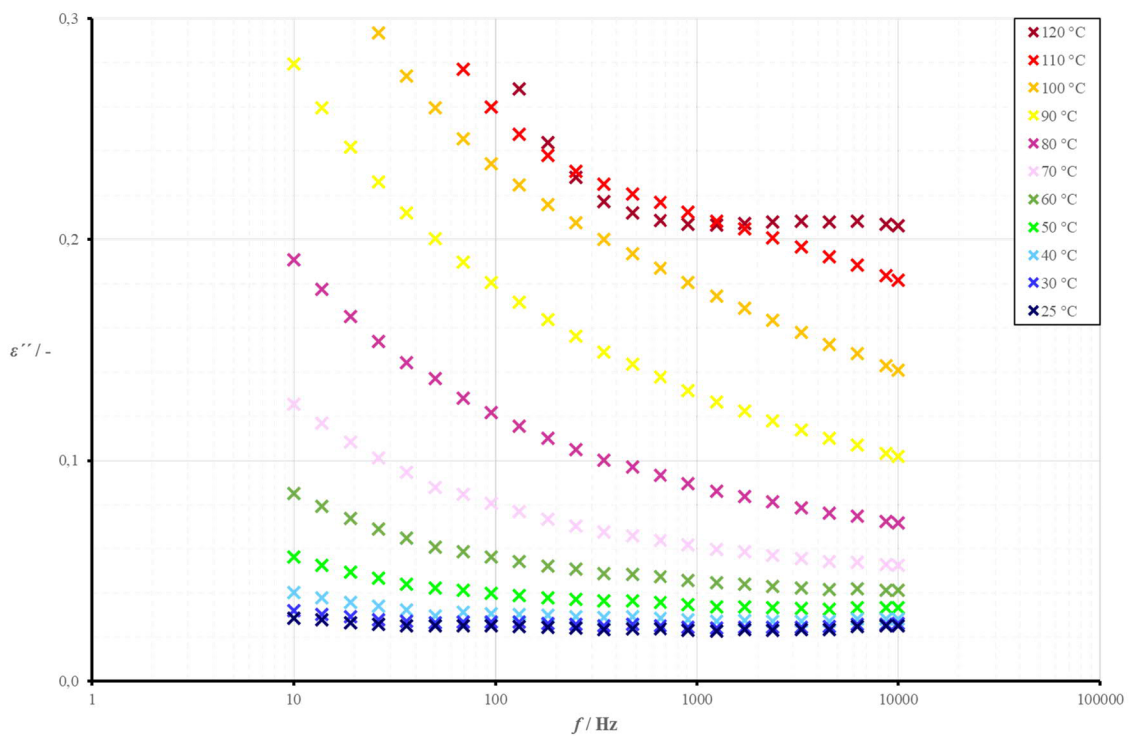
Obrázek 19: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového čísla  $\epsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 2



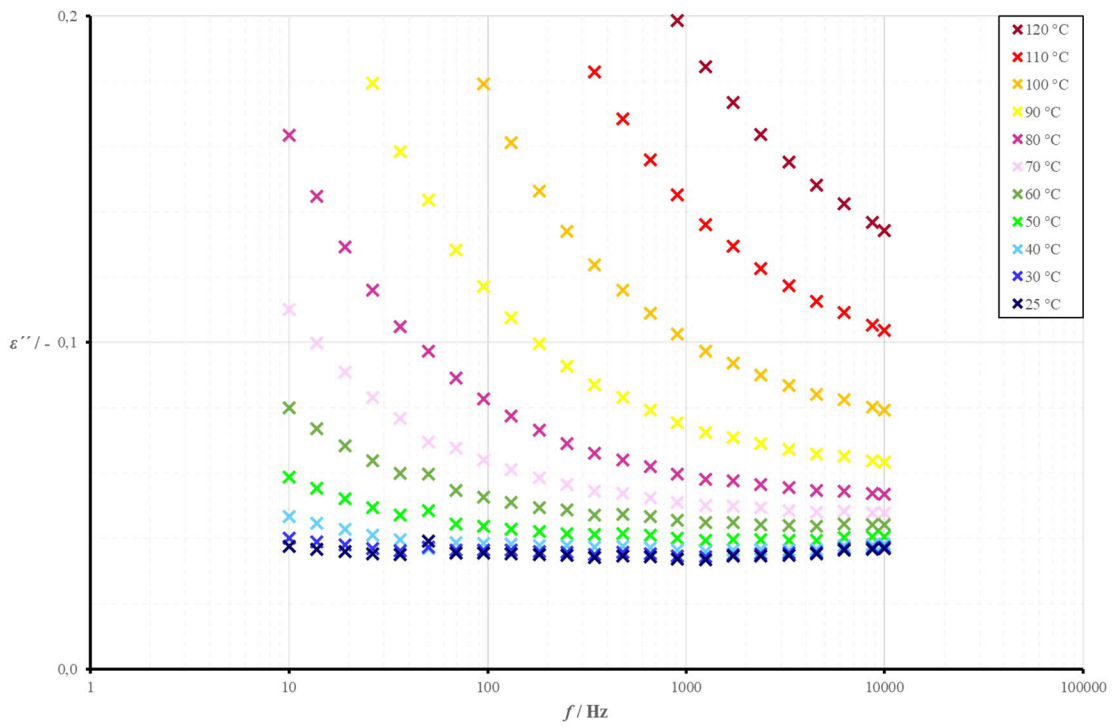
Obrázek 20: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového čísla  $\epsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 3



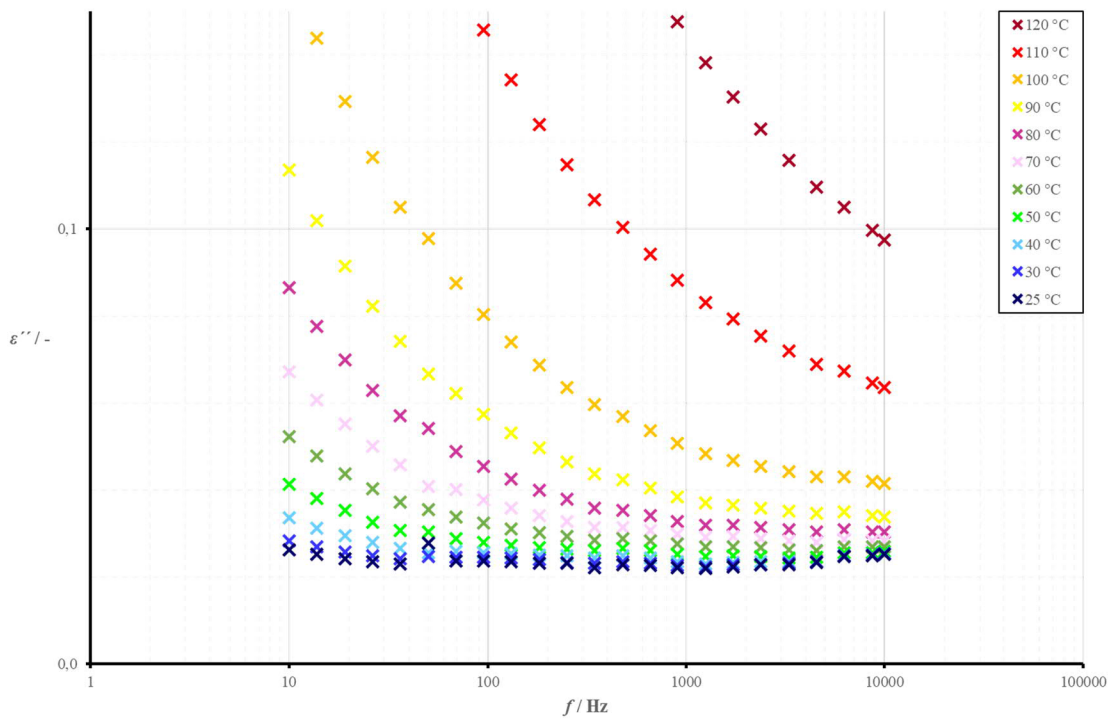
Obrázek 21: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového čísla  $\epsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 4



Obrázek 22: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového čísla  $\epsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 5



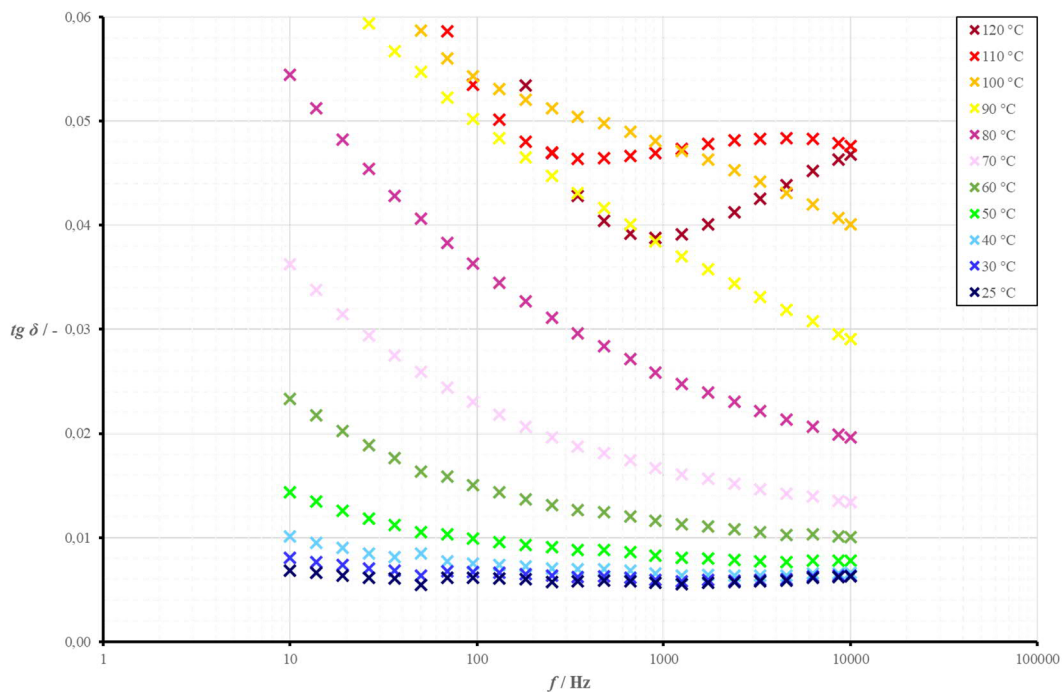
Obrázek 23: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového čísla  $\epsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 6



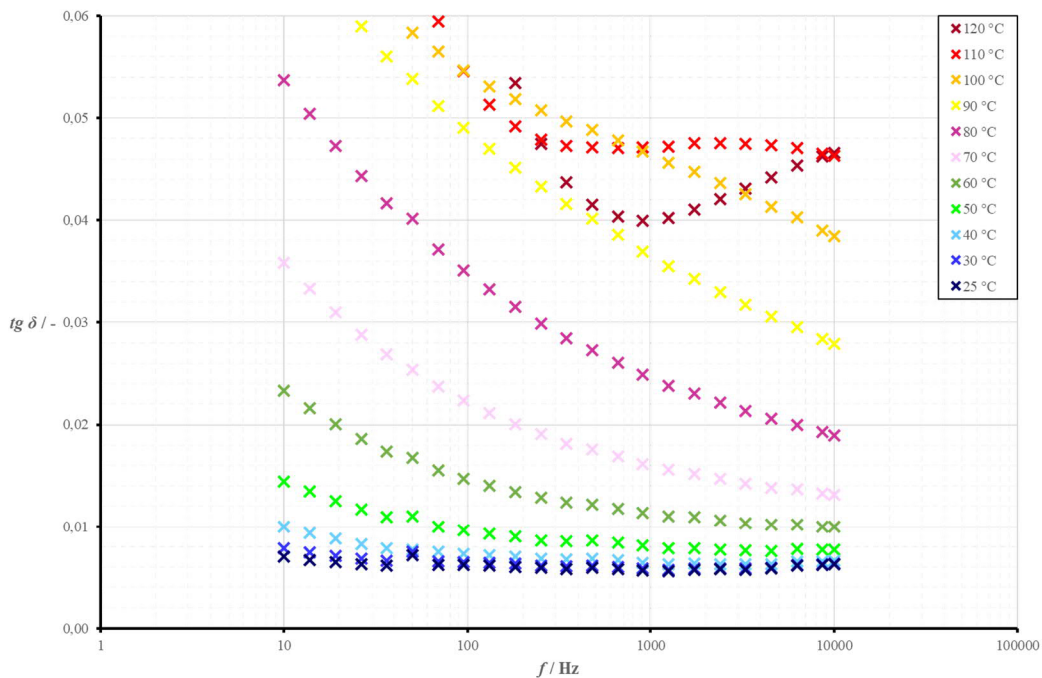
Obrázek 24: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového čísla  $\epsilon''$  pro různé úrovně teplot – sada 7



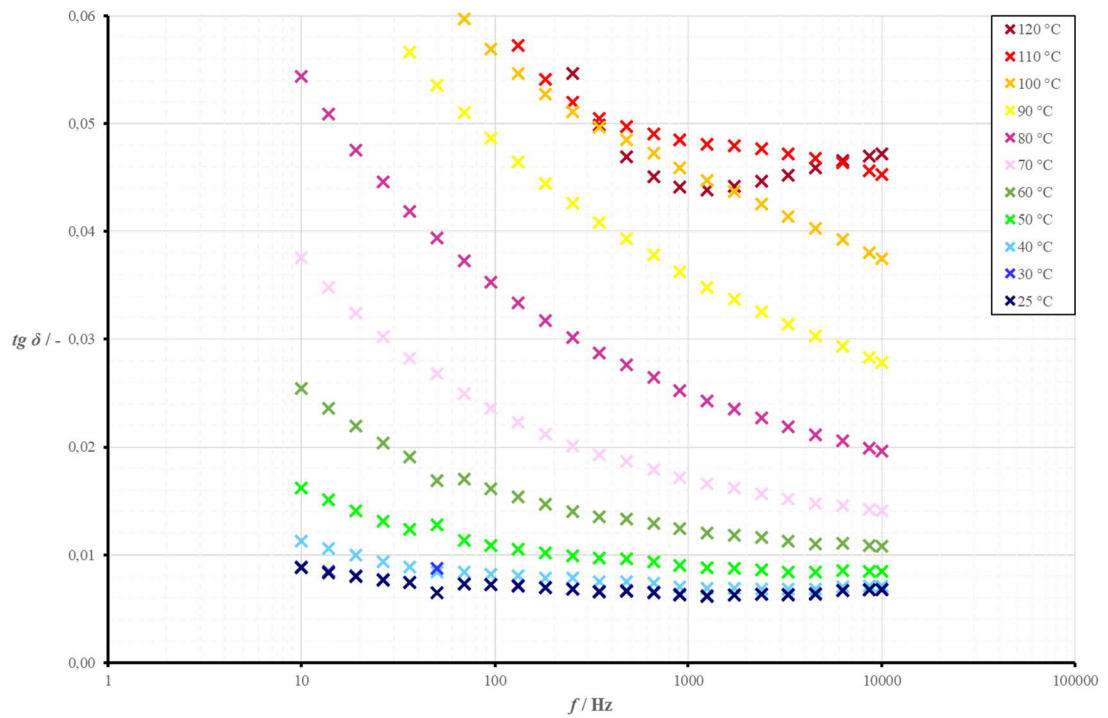
**Příloha 7: Vynesené grafické závislosti ztrátového činitele v závislosti na teplotě a kmitočtu – detail, sady 2 až 7**



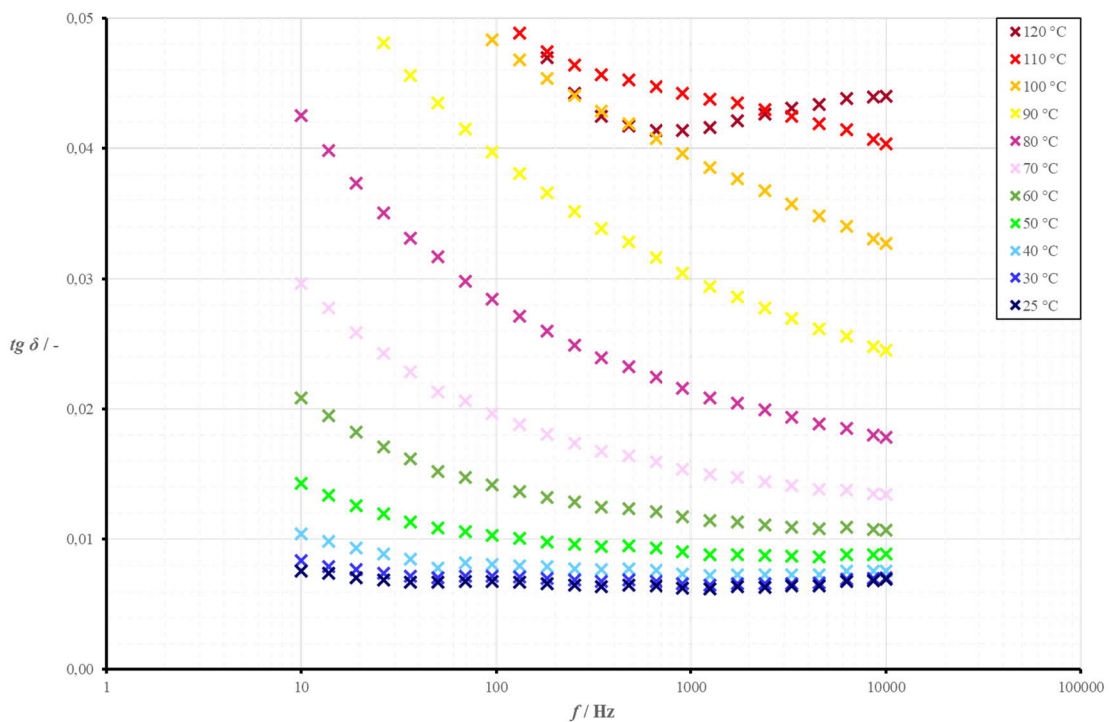
Obrázek 25: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé úrovně teplot – sada 2



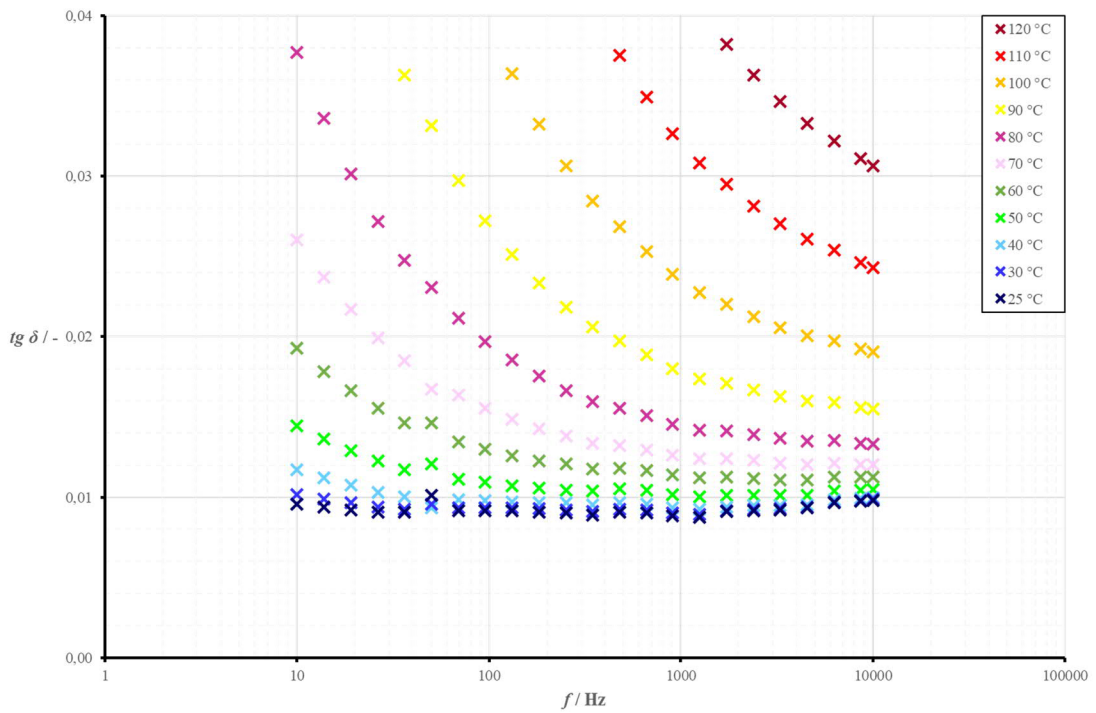
Obrázek 26: Detailnější zobrazení vynesených frekvenčních závislostí ztrátového činitele  $tg\delta$  pro různé úrovně teplot – sada 3



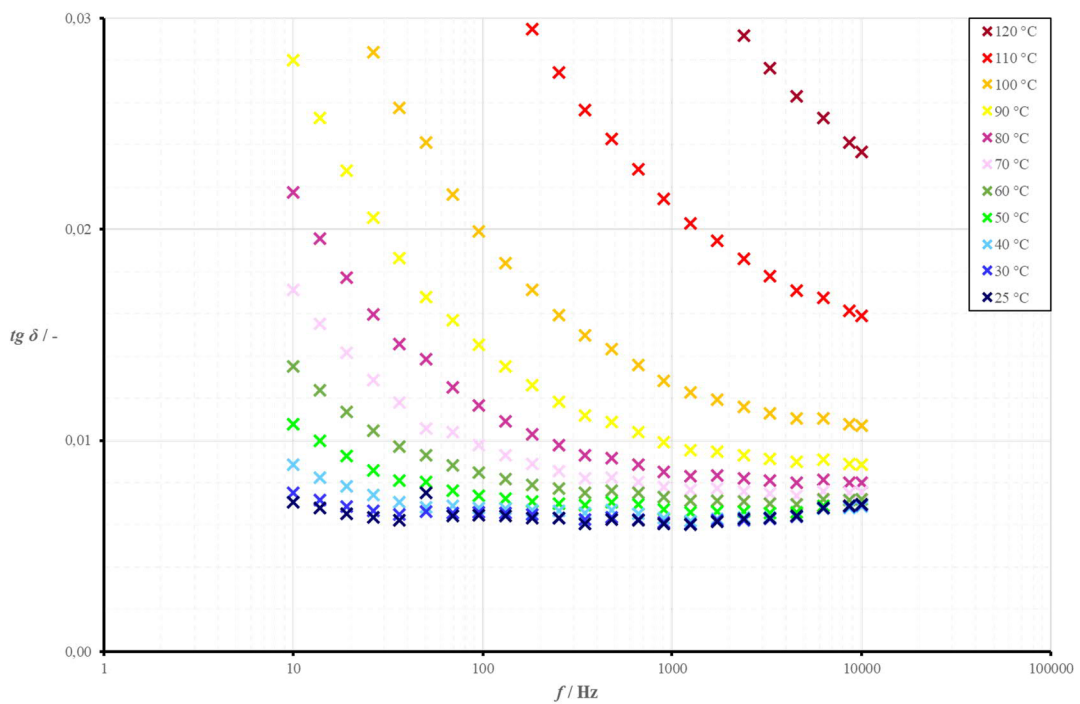
Obrázek 27: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 4



Obrázek 28: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 5

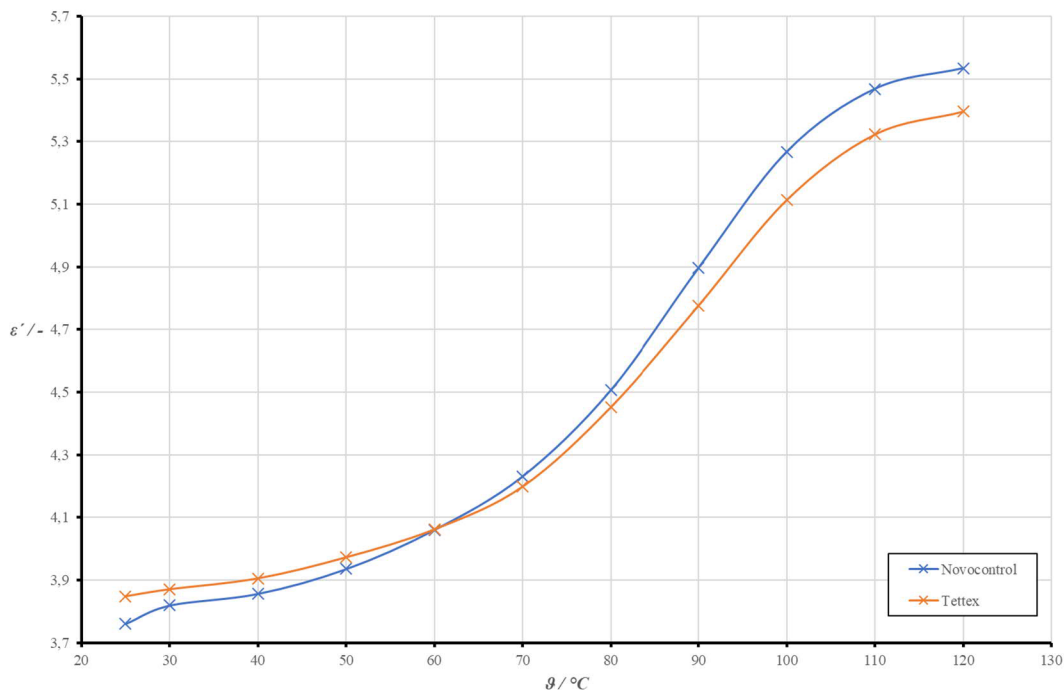


Obrázek 29: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového činitele  $tg \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 6

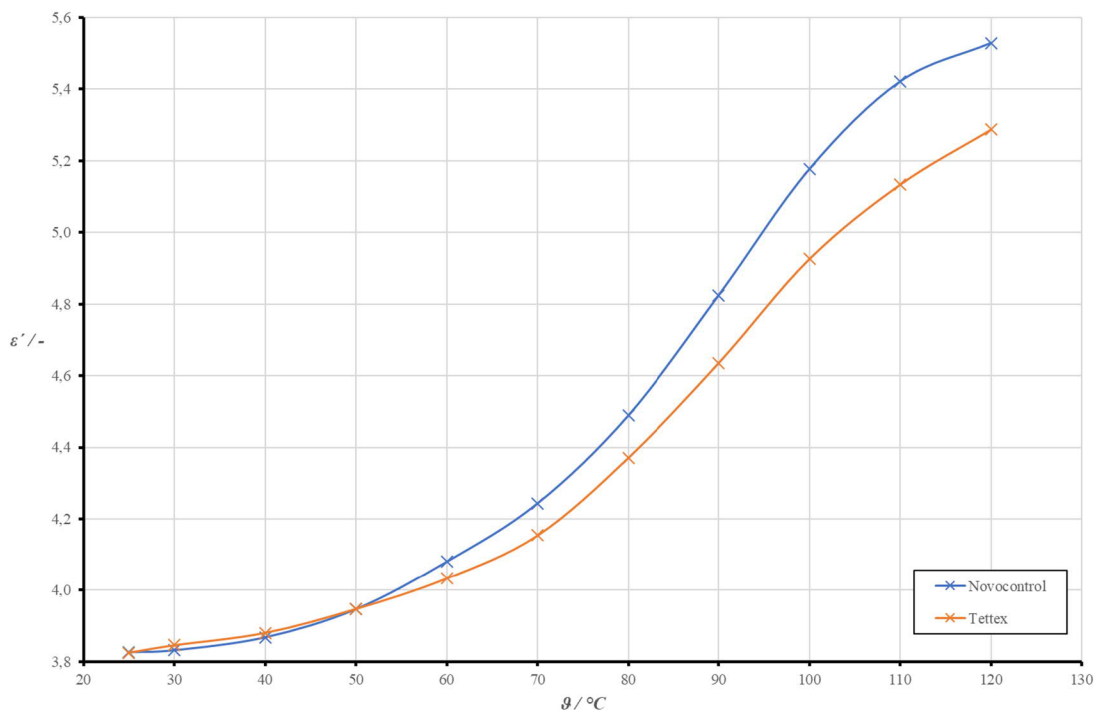


Obrázek 30: Detailnější zobrazení vynesných frekvenčních závislostí ztrátového činitele  $tg \delta$  pro různé úrovně teplot – sada 7

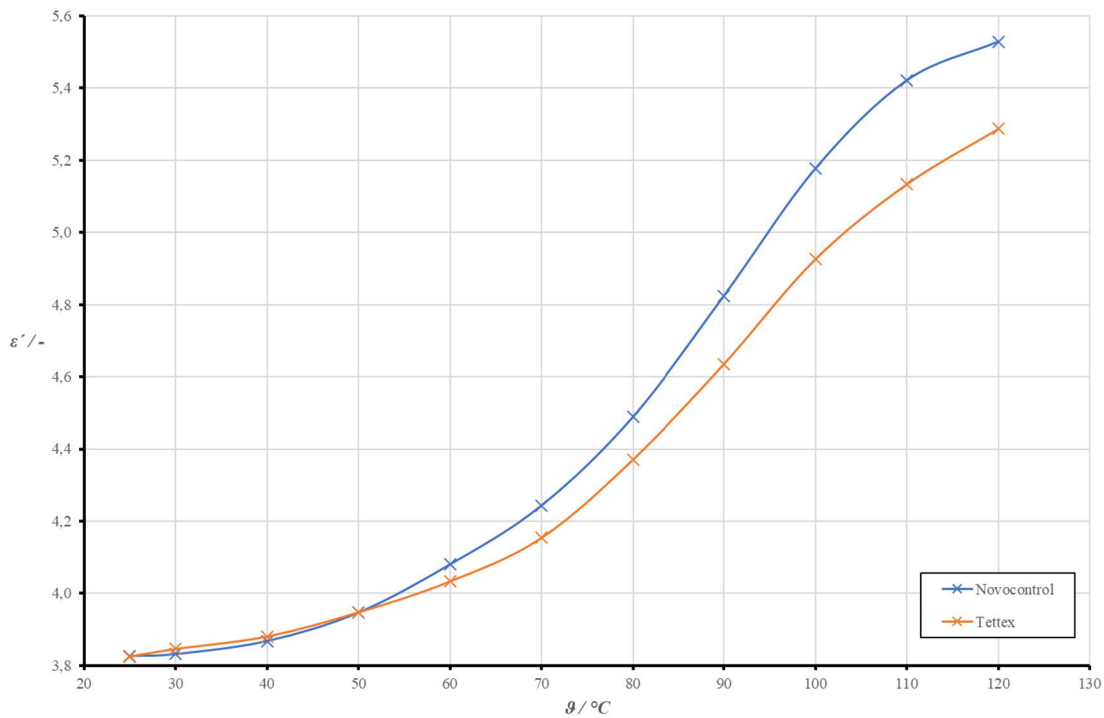
## Příloha 8: Porovnání měřených teplotních závislostí přístrojů Tettex a Novocontrol Technologies při kmitočtu 50 Hz



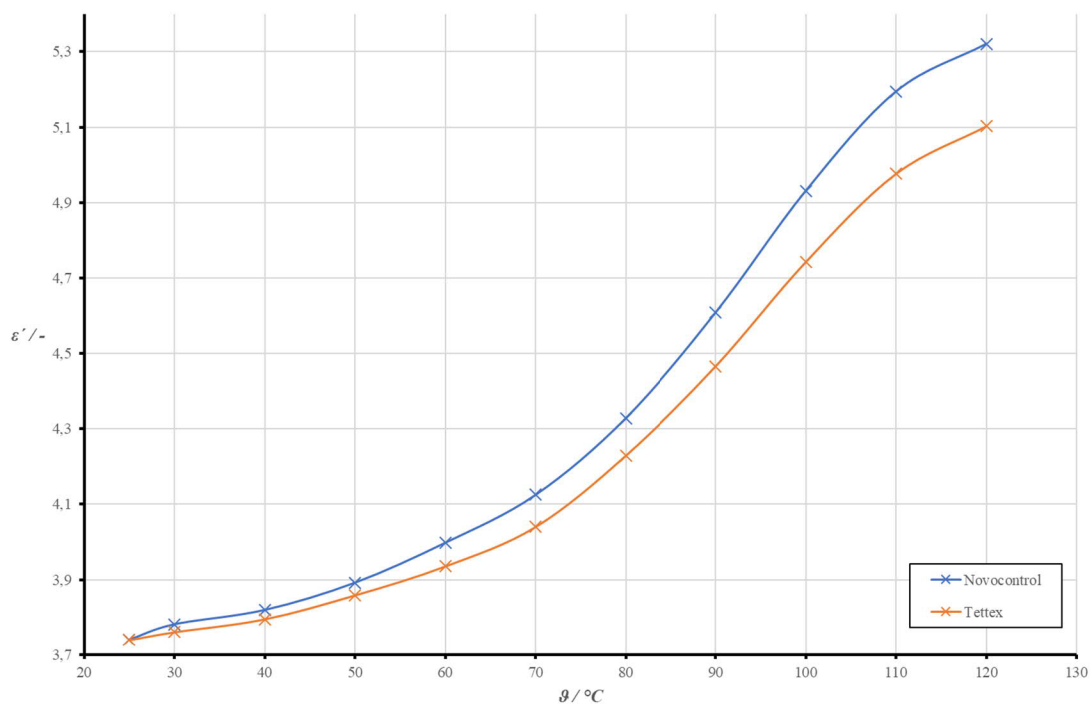
Obrázek 31: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity  $\varepsilon'$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 2



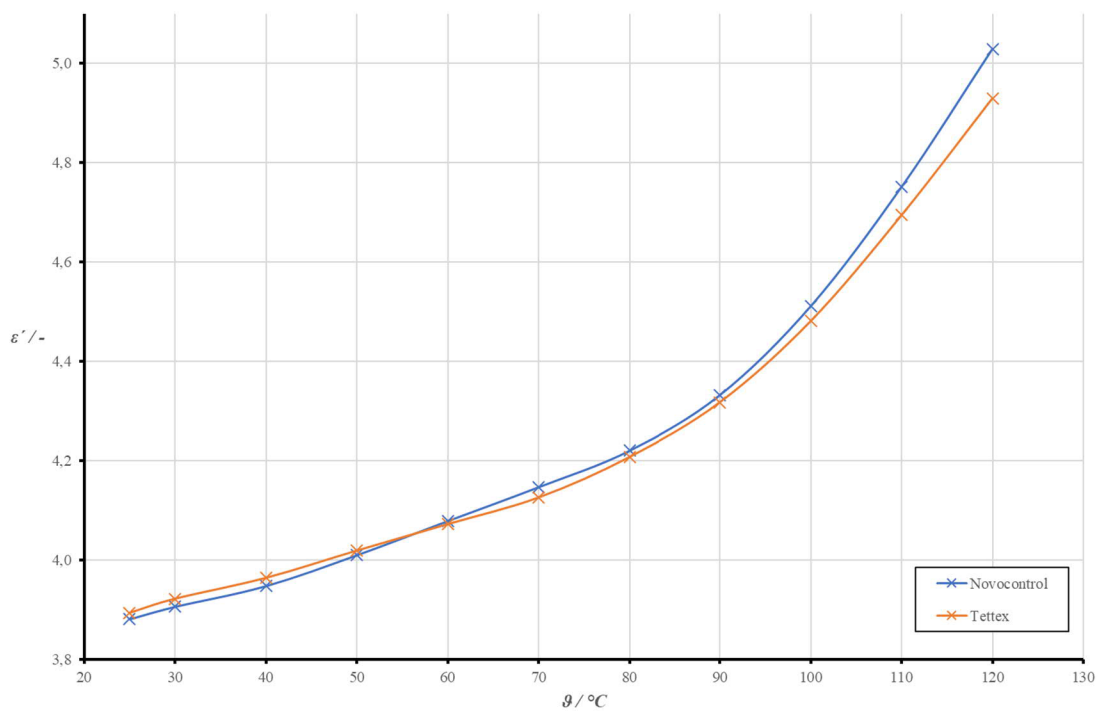
Obrázek 32: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity  $\varepsilon'$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 3



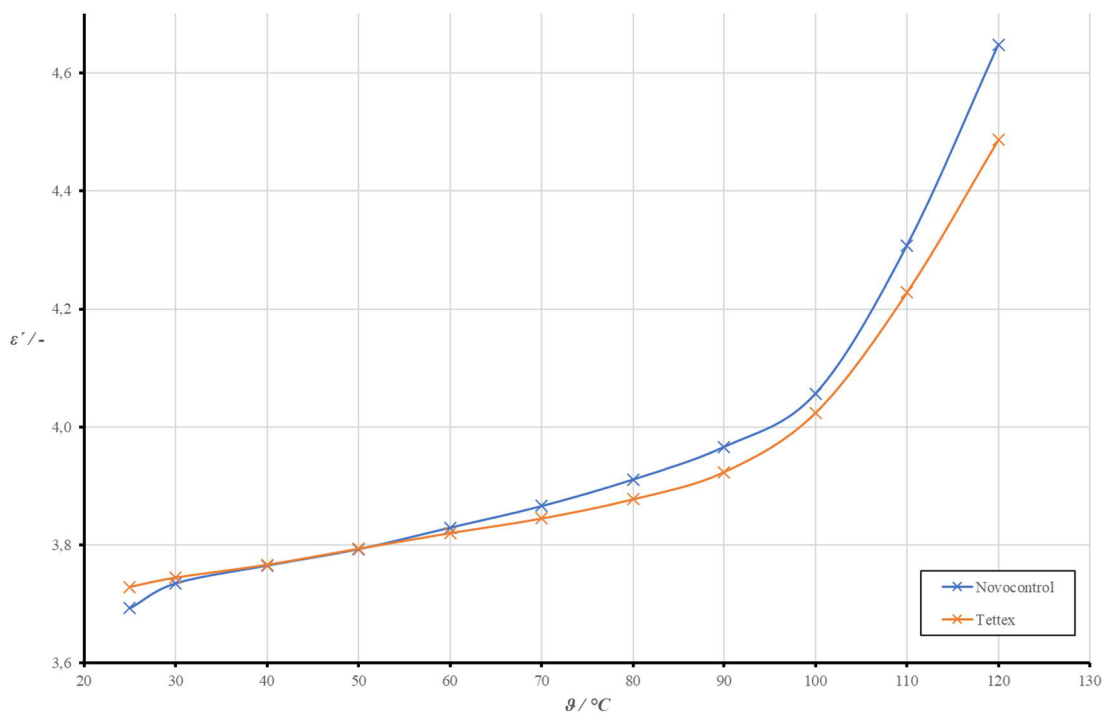
Obrázek 33: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity  $\varepsilon'$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 4



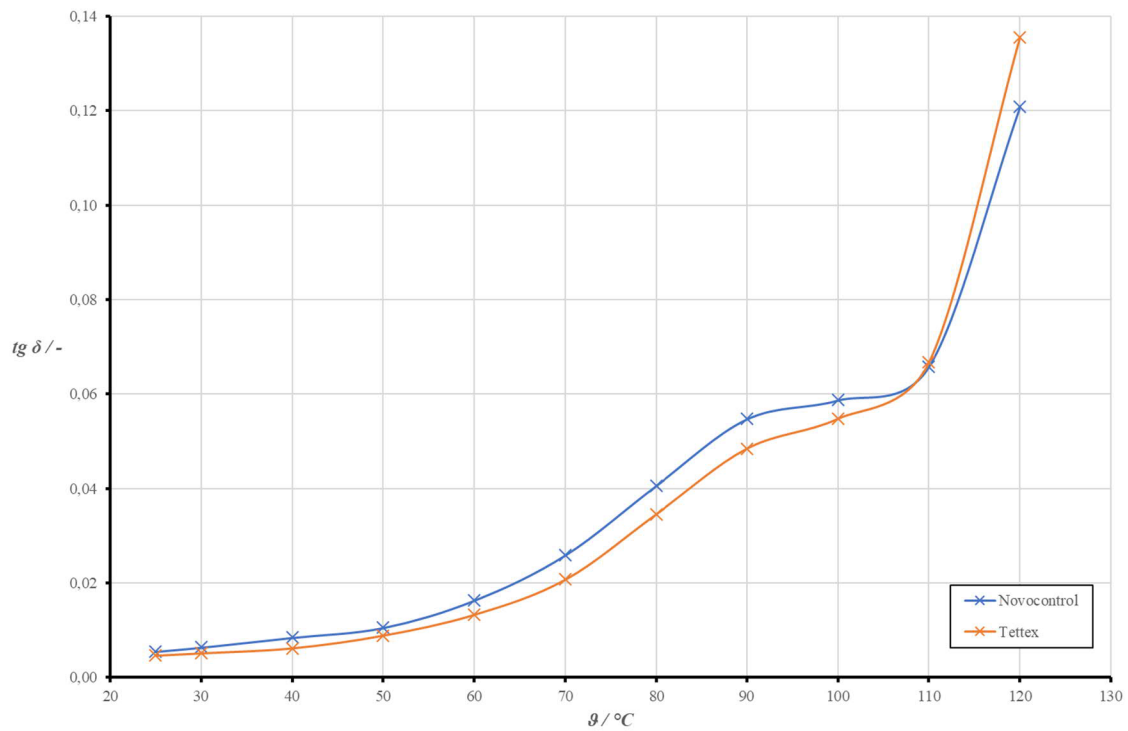
Obrázek 34: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity  $\varepsilon'$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 5



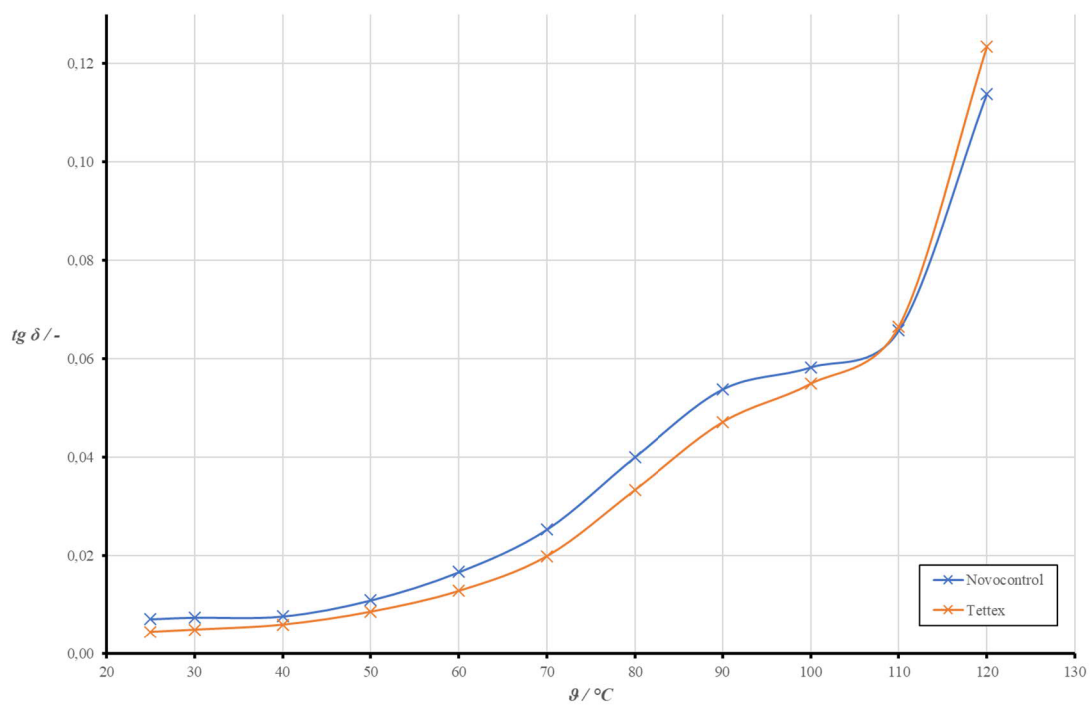
Obrázek 35: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity  $\varepsilon'$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 6



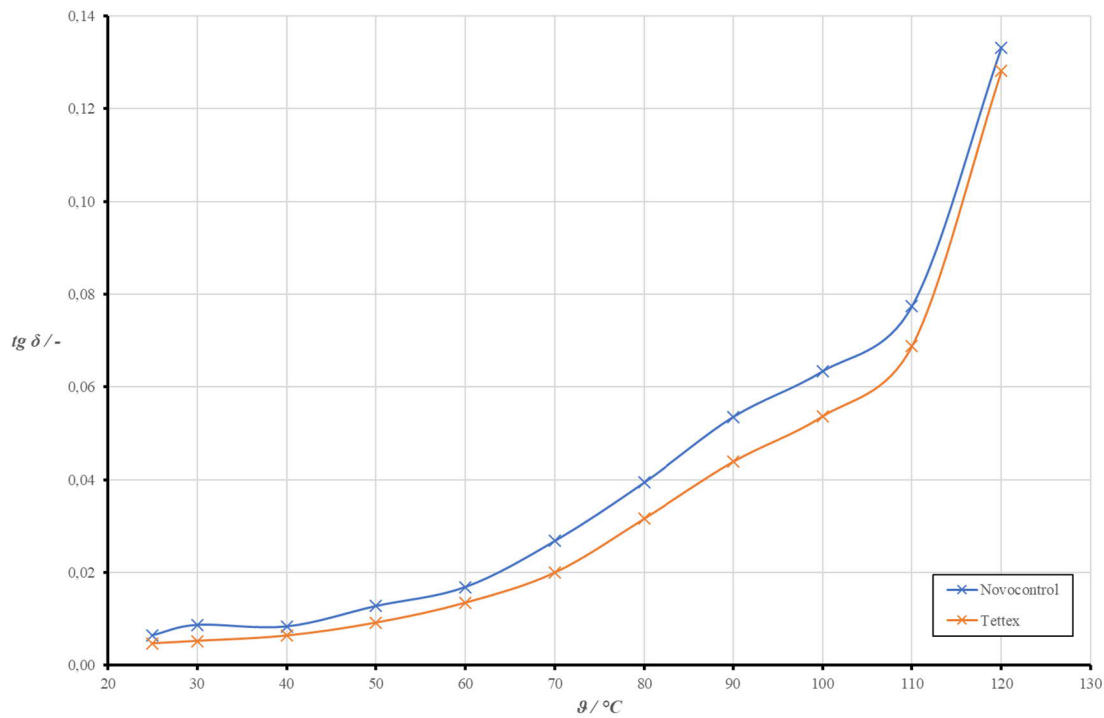
Obrázek 36: Porovnání teplotních závislostí relativní permitivity  $\varepsilon'$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 7



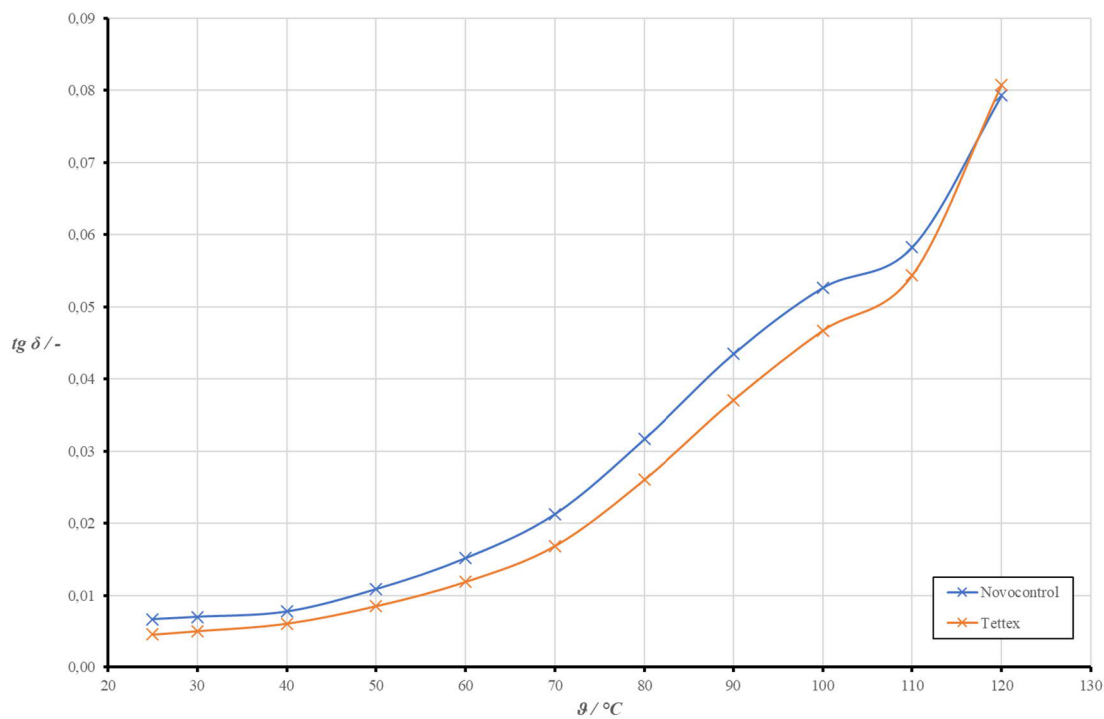
Obrázek 37: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele  $tg \delta$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 2



Obrázek 38: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele  $tg \delta$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 3

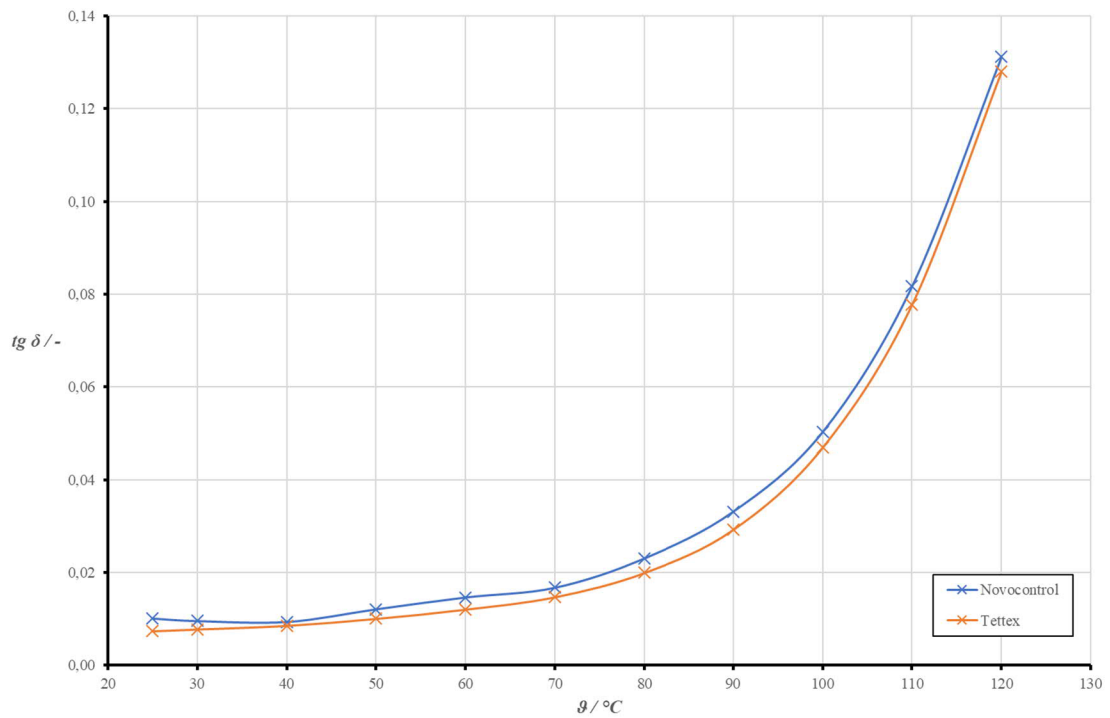


Obrázek 39: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele  $tg\delta$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 4

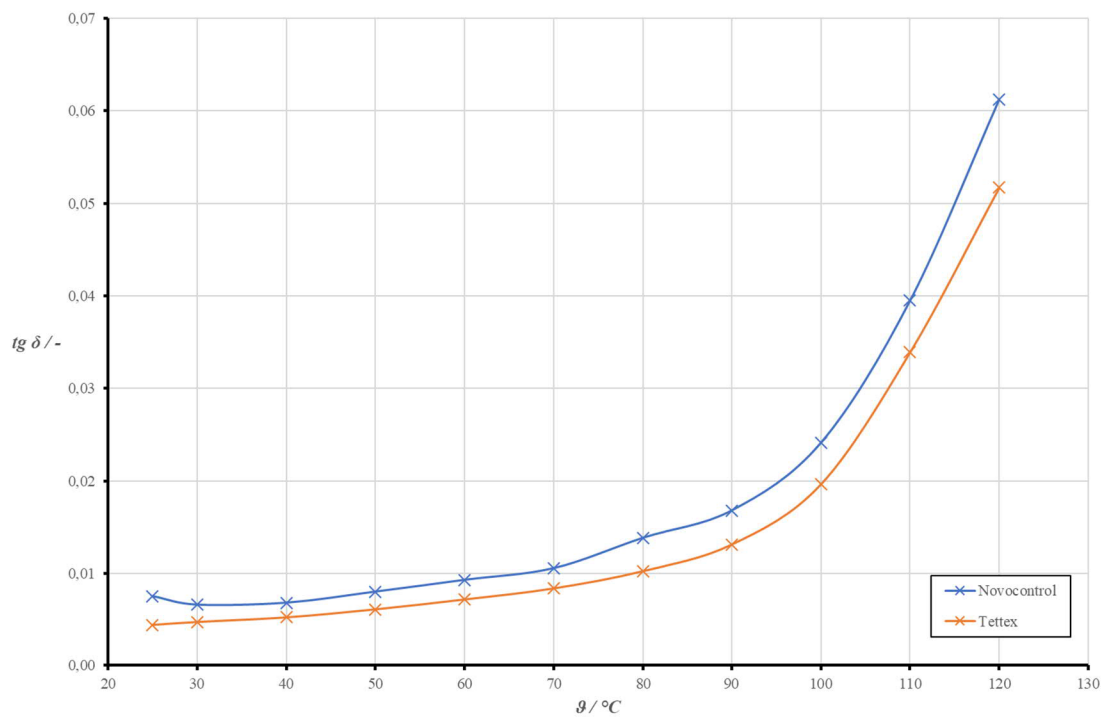


Obrázek 40: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele  $tg\delta$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 5





Obrázek 41: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 6



Obrázek 42: Porovnání teplotních závislostí ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  měřicích přístrojů Tettex a Novocontrol – sada 7