

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Pevná dielektrika ve střídavém a stejnosměrném
elektrickém poli**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá chováním dielektrických materiálů ve stejnosměrném a střídavém poli. Jejím cílem práce je porovnání vlastností měřených vzorků z polyethylenu. V teoretické části objasňuje jak pojem dielektrikum, tak základní principy jevů, jež uvnitř dielektrika vznikají. V experimentální části bylo realizováno měření ve střídavém poli, kde byly materiály zkoumány v závislosti na teplotě a frekvenci. Ve stejnosměrném poli byly měřeny absorpční proudy, ze kterých byly vypočtené polarizační indexy a rezistivity. Výsledky měření mohou být dále využity ke stanovení vhodnosti použití jednotlivých materiálů.

Klíčová slova

Dielektrikum, polarizace, permitivita, ztráty v dielektriku, vodivost, dielektrická absorpce

Abstract

The Bachelor thesis deals with the behavior of dielectric materials in DC and AC fields. The main task is to compare the properties of the polyethylene samples. Theoretical part of the Bachelor thesis explains the concept of dielectric material and the basic principles of phenomena that occur within the dielectric material. The experimental part includes measurements in the alternating field where the materials were investigated in the relation to temperature and frequency. Absorption currents were measured in the DC field, from which the polarization indices and resistivity was calculated. Measurement results could be further used to determine the suitability of the individual materials.

Key words

Dielectric, polarization, dielectric constant, dielectric losses, conductivity, dielectric absorption

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Martin Schneider

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
1 TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 ZÁKLADNÍ SLOŽENÍ LÁTEK	9
1.1.1 <i>Obecné rozdělení elektrotechnických materiálů</i>	9
1.1.2 <i>Vlastnosti nosičů elektrických nábojů</i>	9
1.2 DIELEKTRICKÝ PODSYSTÉM	10
1.2.1 <i>Rozdělení dielektrik podle skupenství</i>	10
1.2.2 <i>Rozdělení dielektrik podle polárnosti</i>	11
1.3 POLARIZACE DIELEKTRIKA	14
1.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST	21
1.5 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	21
1.5.1 <i>Vodivostní ztráty</i>	22
1.5.2 <i>Polarizační ztráty</i>	22
1.5.3 <i>Ionizační ztráty</i>	23
1.5.4 <i>Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli</i>	23
1.5.5 <i>Dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli</i>	23
1.5.6 <i>Dielektrické ztráty v pevných izolantech</i>	23
1.5.7 <i>Ztrátový činitel</i>	24
1.5.8 <i>Náhradní obvody dielektrika</i>	25
1.6 DIELEKTRICKÁ ABSORPCE	27
1.6.1 <i>Polarizační indexy</i>	29
1.6.2 <i>Vnitřní a povrchová rezistivita</i>	30
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
2.1 POPIS MĚŘENÝCH MATERIÁLŮ	32
2.2 DIELEKTRICKÁ SPEKTROSKOPIE	33
2.2.1 <i>Použité měřicí zařízení</i>	33
2.2.2 <i>Postup měření</i>	34
2.2.3 <i>Dosažené výsledky experimentu</i>	35
2.3 ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKY A Z NICH URČOVANÉ PARAMETRY	38
2.3.1 <i>Použité měřicí zařízení</i>	38
2.3.2 <i>Postup měření</i>	39
2.3.3 <i>Dielektrická absorpce</i>	40
2.3.4 <i>Polarizační indexy</i>	43
2.3.5 <i>Vnitřní rezistivita</i>	45
2.3.6 <i>Povrchová rezistivita</i>	46
ZÁVĚR	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48
SEZNAM OBRÁZKŮ	49
PŘÍLOHY	1
TEPLOTNÍ ZÁVISLOSTI	1
FREKVENČNÍ ZÁVISLOSTI	7

Úvod

Hlavní schopnost elektroizolačních materiálů je zabránění průchodu elektrického proudu. Z toho důvodu jsou na použití elektroizolačních materiálů kladeny velmi vysoké požadavky, proto také všechna elektrická zařízení, která elektroizolační materiály využívají, vyžadují vysokou životnost a spolehlivost. Primárně mají dopad na správnou činnost a bezpečnost zařízení.

Při provozu elektrického zařízení působí na elektroizolační materiály mnoho nepříznivých faktorů, kterými jsou například provozní teplota, frekvence, vlhkost, čistota, čas nebo velikost napětí.

Předkládaná bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První část je věnována teoretickému popisu dielektrika, kde je vysvětleno základní složení látek a definice dielektrického podsystemu. Velká část byla věnována tématu principu polarizace dielektrika a jednotlivým polarizačním mechanismům. V neposlední řadě se práce zabývá elektrickou vodivostí dielektrik a dielektrickými ztrátami. Poslední kapitolou této části je dielektrická absorpce, která je typická pro stejnosměrné pole.

Druhá část se zabývá praktickým měřením dielektrik ve střídavém a stejnosměrném poli. Nejprve jsou obecně popsány měřené materiály. Následuje dielektrická spektroskopie, která sleduje chování vzorků v závislosti na teplotě a frekvenci. Nakonec proběhne měření charakteristik absorpčních proudů ve stejnosměrném poli a z nich byly vypočteny polarizační indexy a vnitřní rezistivita.

1 Teoretická část

1.1 Základní složení látek

Molekuly jsou obecně tvořeny z atomů a ty jsou tvořeny z atomového jádra a obalu. Atomové jádro je nejjednodušším systémem, které se skládá z protonů a neutronů. Atomový obal je tvořen elektrony. Každý atom je elektricky neutrální. Má shodný počet protonů a elektronů. [3]

Látka se skládá z molekul vyskytujících se ve formě čistých prvků nebo sloučenin. Na rozdíl od látky, je materiál vyroben za konkrétním účelem a má požadované vlastnosti. Podle struktury a složení jsou dány vlastnosti materiálů. [3]

1.1.1 Obecné rozdělení elektrotechnických materiálů

Elektrotechnické materiály pro jejich aplikace lze rozdělit třemi způsoby. První možnost je dělení podle struktury, druhá možnost je dělení podle skupenství a třetí možnost je dělení podle vlastností elektrických nosičů náboje. [1, 3]

1.1.2 Vlastnosti nosičů elektrických nábojů

Podle velikosti vazebních sil ve vnitřní struktuře látky dělíme nosiče elektrického náboje na volné a vázané. Nosičem je myšlena částice (např. iont, elektron) nesoucí elementární náboj q [C]. [1]

Volné nosiče náboje se mohou libovolně pohybovat materiálem. Materiály obsahující vysoké množství volných nosičů se vyznačují dobrou elektrickou vodivostí a nazývají se vodiče. Materiály s nízkým obsahem těchto nosičů se nazývají dielektrika. Obecně se jedná o volné ionty a elektrony, které se pohybují ve směru působení vnějšího elektrického pole. Volné ionty (kladné a záporné) vznikají disociací (rozkladem) molekul vlastní látky a molekul nečistot. Podílejí se na vzniku elektrického proudu. [1]

Vázané nosiče elektrického náboje jsou pevně drženy ve svých rovnovážných polohách. Vázané nosiče mají pevně stanovené místo v jejich vnitřní struktuře. Tyto nosiče se rozdělují

na silně a slabě vázané. Působením elektrického pole reagují malou změnou polohy. Vazby atomů obecně určují, jak se budou vázané nosiče chovat ve vnějším elektrickém poli. [1]

1.2 Dielektrický podsystém

Nejprve je nutné uvést rozdíl mezi dielektrikem a izolantem. Dielektrikum je velmi obecný a nadřazený pojem. Znamená to, že izolanty jsou podmnožinou dielektrik. [1]

Dielektrikum je látka, která je tvořena z elektricky nabitých částic. Tyto částice jsou na sebe pevně vázané. Náboje jsou vázány v molekulách, iontech nebo atomech. Po vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole se projeví hlavní vlastnost tzv. polarizace. Tím se v látce vytvoří elektrické dipóly. Díky polarizaci může v dielektriku existovat vlastní elektrické pole. Dielektrikum je látka se schopností akumulace elektrické energie po přiložení do vnějšího elektrického pole (kondenzátor). Jedná se tedy o aktivní prvek. [1]

Elektrický izolant je materiál s vlastností bránící průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Ideální elektrický izolant neobsahuje žádné volné částice s elektrickým nábojem a má nekonečně velký izolační odpor. Ideální izolant můžeme brát jako pasivní prvek. V technické praxi reálný izolant obsahuje nejen silně vázané nosiče elektrického náboje, ale i velmi malé množství volně pohyblivých nosičů elektrického náboje. Volnými nosiči nábojů jsou zpravidla kladně nebo záporně nabití ionty. Měrná elektrická vodivost je tedy závislá na koncentraci volných nosičů nábojů a na stupni čistoty materiálu. Mezi elektrické vlastnosti izolantu se řadí: vysoký izolační odpor, vysoká elektrická pevnost, nízká relativní permitivita a nízký ztrátový činitel. Provozní podmínky (teplota, tlak, napětí a frekvence) ovlivňují elektrické vlastnosti izolantu. Další důležité vlastnosti izolantů jsou mechanické, tepelné a fyzikálně chemické. [1]

1.2.1 Rozdělení dielektrik podle skupenství

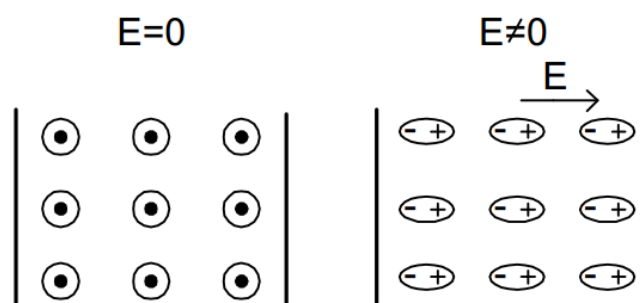
Dělení podle skupenství je významné z hlediska fyzikálních i elektrických vlastností. Skupenství dielektrika lze rozdělit na plynné, kapalně a pevné. Tyto dielektrika se dělí na polární a nepolární. Hlavní náplní této práce jsou vlastnosti pevných dielektrik. Pevná dielektrika se dále dělí podle jejich vnitřní struktury (stavby) na krystalická a amorfní (nekrystalická). Krystalické struktury mající střed souměrnosti nazýváme středosymetrickými. [1]

1.2.2 Rozdělení dielektrik podle polárnosti

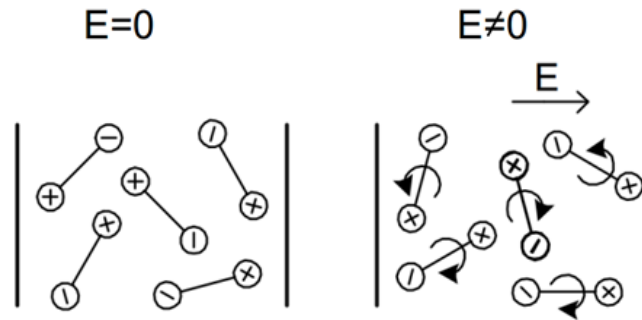
Dělení dielektrik podle polárnosti je účelné a používané. Navzájem se odlišují skladbou hmoty i chováním v elektrickém poli. [6]

U **nepolární** látky (dielektrika) se polarizační děj odehrává uvnitř atomu. Bez přiloženého vnějšího elektrického pole mají kladné náboje (v jádře) a záporné náboje (elektronový obal) totožné těžiště ve středu jádra. V případě působení elektrického pole na nepolární látky vyvolá malý posun kladného náboje ve směru přiloženého vnějšího pole. Záporný náboj se vychýlí v opačném směru působícího pole. [6]

Polární dielektrikum je látka, která má ve svém objemu permanentní dipólové momenty i pokud není dielektrikum vystaveno působením vnějšího elektrického pole. Existence dipólových momentů v polárním dielektriku je dána strukturou látky. U polární látky (dielektrika) bez přiloženého vnějšího pole se elementární dipóly navzájem elektricky ovlivňují, jsou náhodně orientovány a jejich vzájemné působení se vyruší. Díky tomu, se polární dielektrikum celkově jeví neutrálně. V opačném případě, kdy na polární dielektrikum začne působit vnější elektrické pole, začne působit na konce dipólů točivý moment, který dipóly pootočí o určitý úhel ve směru působení elektrického pole. Velikost úhlu je závislá na velikosti elektrického pole. [6]



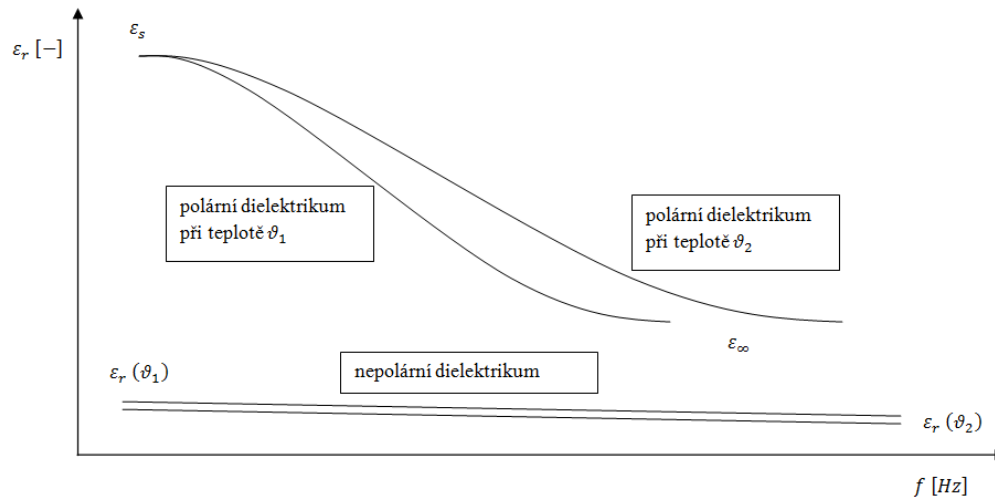
Obr. 1.1: Nepochární dielektrikum



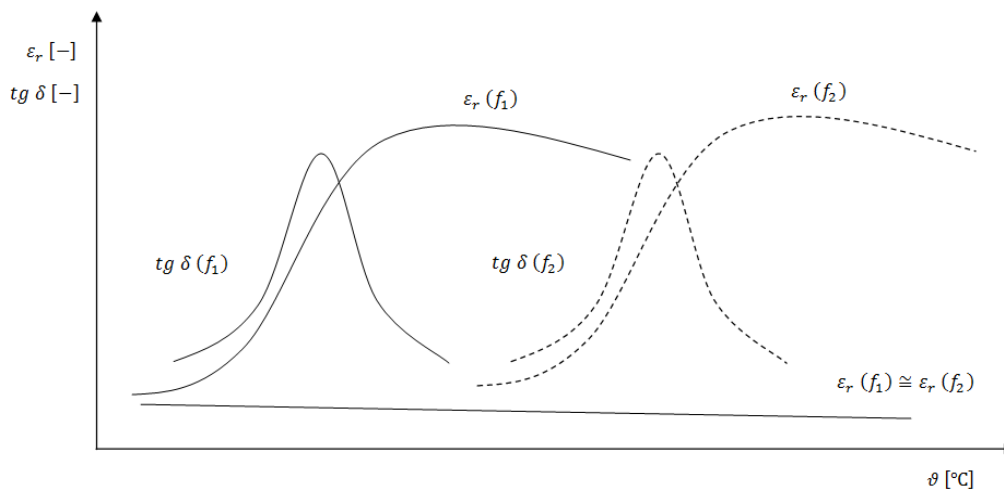
Obr. 1.2: Polární dielektriku

Závislost relativní permitivity na teplotě a frekvenci

Ve vnějším elektrickém poli je polárnost či nepolárnost dielektrika velmi významná vlastnost pro zkoumání jeho chování. S polárností dielektrika také souvisí velikost relativní permitivity a dielektrických ztrát. Na obrázku je za rozdílných teplot zobrazena kmitočtová závislost relativní permitivity při konstantním napětí. U nepolárních dielektrik se projevují pouze rychlé deformační polarizace. Frekvenční a teplotní závislost se neprojevuje. Z (Obr. 1.3) lze pozorovat nepatrnou změnu relativní permitivity, která je způsobena roztažností látek. Při zvýšení teploty, díky roztažnosti látky, klesá počet atomů v jednotkovém objemu. Tím se sníží počet indukovaných dipólů. Tato změna je ve srovnání s polárními dielektriky malá. Naopak je tomu u polárních dielektrik. Čas a energetické nároky, které jsou nutné k posuvu dipólů do krajních poloh, jsou závislé na daném prostředí, kde tento proces probíhá. Důležitou roli sehrává vnitřní viskozita. Vnitřní viskozita udává možnosti posuvu elektrických dipólů do směru vnějšího pole. Kromě teploty ovlivňuje chování dipólů i frekvence. Při malé frekvenci se dipóly stíhají natočit do svých krajních poloh, a proto je polarizace i relativní permitivita velká. Jakmile se zvyšuje frekvence, dipóly se nestíhají natáčet do svých krajních poloh. Polarizace a zároveň relativní permitivita klesá. Při rostoucí teplotě klesá i vnitřní viskozita látky. S viskozitou je úzce spojeno i vnitřní tření látky. Dipóly jsou schopné reagovat na rychlejší změny elektrického pole. U frekvenčních závislostí vyvolá vyšší teplota posun křivky do oblasti vyšších kmitočtů. [6]



Obr. 1.3: Frekvenční závislost relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika pro dvě teploty



Obr. 1.4: Teplotní závislost relativní permitivity a ztrátového čísla polárního a nepolárního dielektrika při dvou kmitočtech

Závislost ztrátového činitele na teplotě a frekvenci

U nepolárního dielektrika se vyskytuje jen polarizace atomů, která způsobuje dielektrické ztráty a ty jsou nepatrné stejně jako hodnota ztrátového činitele. Naopak u polárního dielektrika je změna ztrátového činitele obrovská a významná v praxi. V úzkém teplotním rozmezí dochází k prudkému nárůstu a posléze poklesu ztrátového činitele. Maximální bod této křivky se nachází v místě nejprudšího vzestupu relativní permitivity. [6]

1.3 Polarizace dielektrika

Polarizační procesy jsou ovlivněny stavbou a strukturou zkoumané látky. V reálném dielektriku běžně vzniká více polarizačních procesů v určitém okamžiku. Součtem všech polarizačních procesů vzniká celková polarizace, která úzce souvisí s dielektrickými ztrátami.

Polarizace způsobená elektrickým polem

Polarizace dielektrika je fyzikální děj, který nastává vložением dielektrika do vnějšího elektrického pole. Polarizace budou popsány pro tři druhy těchto polí: střídavé, stejnosměrné a elektrostatické. Působením vnějšího i vnitřního elektrického pole se posouvají elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh. Nové polohy jsou omezené malou vzdáleností. Jedná se pouze o lokální pootočení dipólu. U ideálních izolantů neprotéká žádný elektrický proud, protože neobsahuje volné nosiče elektrického náboje. Polarizační procesy vznikají v okamžiku vložení izolantu do vnějšího elektrického pole. Dielektrikum má schopnost vzniku vlastního vnitřního elektrického pole. Jedná se o aktivní látku. Polarizační děje jsou ovlivněny stavbou a strukturou zkoumané látky. Průběh polarizačních jevů lze obecně sledovat makroskopicky a mikroskopicky. [1]

Makroskopický přístup

V prvním případě sledujeme polarizaci dielektrika z makroskopického hlediska. V tomto pohledu bereme dielektrikum za určitý objekt jasně daných rozměrů, kde zkoumáme jen vnější projevy polarizačních dějů, nikoliv však děje samotné. V makroskopickém přístupu je hlavní jen celkový výsledek polarizace, který se projeví vznikem elektrického náboje na povrchu zkoumaného dielektrika. Tím vzniká celkový dipólový moment zkoumaného dielektrika. Zpolarizované dielektrikum je popsáno na základě makroskopického pohledu vektorem polarizace \vec{P} [$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$]. Pro vektor polarizace platí vztah:

$$\vec{P} = \frac{\vec{M}}{V} \quad (1.1)$$

\vec{M} [$\text{C} \cdot \text{m}$] je orientovaný dipólový moment látky. V [m^3] je objem dané látky. [1]

Mikroskopický přístup

V druhém případě sledujeme polarizaci dielektrika z mikroskopického hlediska. Tento pohled na polarizaci dielektrika sleduje změny vzniklé ve struktuře dielektrika a poskytuje znalosti o polarizačních jevech probíhajících uvnitř dielektrika. Na vnitřní struktuře látky závisí možnost, rychlost a vzdálenost pohybu elektrického nosiče náboje. [1]

Vznik nových dipólových momentů je podmíněn působením vnějšího elektrického pole na dielektrikum. Pro nové dipóly se také používá termín indukované dipóly. Splývající těžiště kladného a záporného náboje zaujmou nově vzniklé rovnovážné polohy. Nové polohy mají své určité vzájemné vzdálenosti. Pokud zanikne působení vnějšího elektrického pole, kladné a záporné náboje se vrátí zpět na svá původní místa. V tomto případě jde o nepolární látku. [1]

Orientace existujících dipólů. Ve struktuře materiálu jsou přítomné stálé permanentní dipólové momenty. Výskyt permanentních dipólových momentů není závislý na působení elektrického pole. V tomto případě tedy nevznikají nové dipólové momenty, pouze stávající dipóly se natočí do směru působícího elektrického pole. Zde jde o polární látku. [1]

Dielektrikum ve vnějším elektrickém poli

Pro charakterizaci polarizačních dějů se běžně využívá permitivita. Permitivita je fyzikální bezrozměrná veličina, která udává poměr mezi vektorem elektrické indukce \vec{D} [$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$] a vektorem intenzity elektrického pole \vec{E} [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]. Pro vektor elektrické indukce je používán vztah:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (1.2)$$

Kde ε_r je relativní permitivita a ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$)

Relativní permitivitu lze vyjádřit poměrem kapacit kondenzátoru s reálným dielektrikem a dielektrikem vakua. Pro relativní permitivitu potom platí:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.3)$$

Kde C_x [F] je kapacita daného kondenzátoru a C_0 [F] je kapacita vakuového kondenzátoru shodných rozměrů (geometrická kapacita). Relativní permitivita pro vakuum je rovna jedné, protože ve vakuu k polarizacím nedochází. U ostatních dielektrik je $\varepsilon_r > 1$. V některých literaturách byla relativní permitivita nazývána Dielektrickou konstantou. [1]

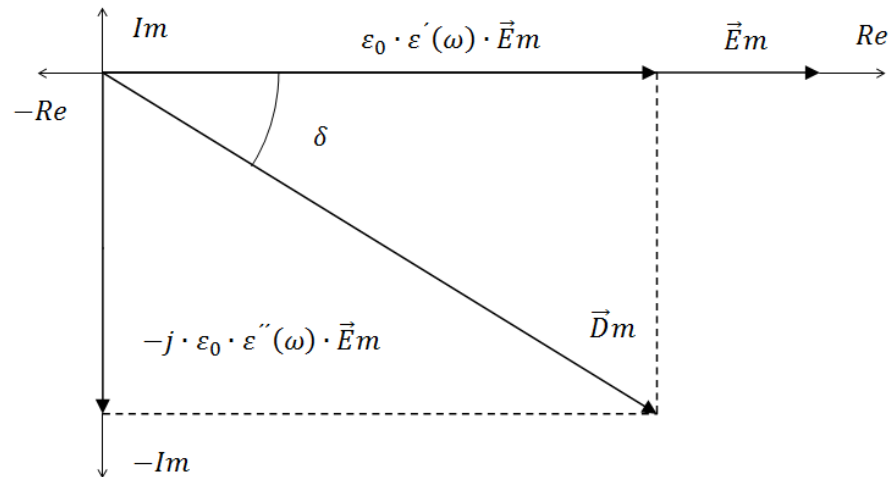
Pro vakuový kondenzátor je používán vztah:

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1.4)$$

Kde S [m²] je plocha elektrod a d [m] je vzdálenost elektrod. Vliv střídavého elektrického pole na dielektrika je možné popsat komplexní permitivitou. Ve střídavém elektrickém poli je komplexní permitivita vyjádřena vztahem:

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - \varepsilon''(\omega) \quad (1.5)$$

kde $\varepsilon'(\omega)$ [-] je frekvenčně závislá reálná složka a $\varepsilon''(\omega)$ [-] je frekvenčně závislá imaginární složka komplexní permitivity. Reálná složka představuje vlastní relativní permitivitu a ta udává míru kapacitního charakteru. Reálná složka má stejný význam jako relativní permitivita ve statickém poli. Imaginární složka je v praxi nazývána ztrátovým číslem. Pokud je tedy dielektrikum vystaveno střídavému elektrickému poli, pak imaginární složka udává míru vzniklých ztrát v dielektriku. [1]



Obr. 1.5: Grafická interpretace komplexní permitivity, kde E_m a D_m jsou amplitudy příslušných vektorů [1]

Z vektorového diagramu na obrázku (Obr. 1.5) je možné vyjádřit ztrátový činitel $\tan \delta$ poměrem imaginární a reálné složky komplexní permitivity vztahem:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon''(\omega) \cdot \vec{E}_m}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega) \cdot \vec{E}_m} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (1.6)$$

Z uvedených vztahů je patrná souvislost mezi permitivitou, kapacitou a ztrátovým činitelem.

Polarizační mechanismy

Rozhodujícím faktorem na průběh polarizace je struktura a stavba dielektrické látky. V dané látce často vzniká současně více polarizačních mechanismů, které jsou závislé na vnitřním uspořádání látky. Dominantní polarizační mechanismy často překrývají slabší, kde výsledný průběh polarizace je dán superpozicí všech polarizačních procesů. [1]

Deformační polarizace

Jedná se o polarizace, které se vyznačují velmi rychlým průběhem. Proběhne v podstatě okamžitě. Doba trvání procesu je extrémně krátká. Deformační polarizace se často nazývají také pružné (rychlé) polarizace. V atomu, molekule nebo krystalu je silně vázaný nosič náboje pevně držen ve své rovnovážné poloze. Působení vnějšího elektrostatického pole se silně

vázané nosiče náboje nepatrně vychýlí ze svých rovnovážných poloh. Extrémně rychlé polarizace jsou dány pevnou vazbou nosičů elektrického náboje. Posunutí mnoha nosičů náboje může podstatně ovlivnit relativní permitivitu. Jakmile přestane působit vnější elektrické pole, nastane opačný proces a pevná vazba vrátí nosiče náboje zpět do své původní rovnovážné polohy. Opačný proces je také extrémně rychlý. Deformační polarizace jsou nezávislé na reálných provozních podmínkách, tzn. na tlaku, frekvenci a teplotě. Tato nezávislost platí jen pro určitý interval hodnot, kdy nedochází k rozrušení látky nebo fázové přeměny (změna struktury). Pevnost a pružnost vazby udává fakt, že jde o bezetrátové polarizace. Pružné deformační polarizace se dále dělí na jednotlivé tři polarizace. [1, 3]

Elektronová polarizace

Působení vnějšího elektrického pole vyvolá nepatrný posun atomového jádra ve shodném směru s orientací pole. Elektrony se vychýlí v opačném směru orientace pole. Po ustálení polarizace se vyrovnají síly elektrického pole se silou přitahující částice náboje do původní stabilní polohy. Doba ustálení nové stabilní polohy trvá v rozmezí 10^{-16} až 10^{-14} . Z toho je patrné, že při běžných kmitočtech je elektronová polarizace frekvenčně nezávislá. Hlavní část indukovaného dipólového momentu je dána právě pohybem elektronů. Tím dochází k deformaci stávajícího tvaru elektronového obalu. Nejvíce se vychýlí valenční elektrony, neboť jsou nejslaběji vázané k jádru atomu. Velikost vychýlení je nepřímo úměrná hmotnosti atomů. Dále velikost vychýlení závisí na schopnosti polarizovat se a na velikosti lokálního pole. Je nutné poznamenat, že jde o bezetrátovou polarizaci, která probíhá u látek všech skupenství. [1, 3]

Iontová polarizace

Hlavním změnou od předchozí elektronové polarizace je výskyt určitých dipólových momentů v látce i bez působení vnějšího elektrického pole. Jestliže vystavíme danou látku vnějšímu elektrickému poli vzniká pružné posunutí iontů ve směru orientace pole. Vzniklé permanentní dipóly jsou dány strukturou látky tvořené iontovými krystaly. Ionty jsou v krystalové mřížce látky pevně vázány elektrostatickými silami. Iontová polarizace vzniká u látek s iontovou nebo částečně iontovou vazbou. V druhém případě je myšlena přechodná vazba mezi iontovou a kovalentní. V některé literatuře je pro tento případ vazby používán výraz atomová polarizace. U iontové polarizace dochází k ustálení děje v časovém rozmezí

10^{-13} až 10^{-12} . V porovnání s elektronovou polarizací je doba ustálení delší, ale stále ji lze považovat za frekvenčně nezávislou a také bezeztrátovou. [1, 3]

Polarizace pružně vázaných dipólových momentů

Tento druh polarizace vzniká u pevných dielektrik a svou podstatou je téměř shodná s iontovou polarizací. Molekuly látky jsou zároveň vázány značně silnými vazbami a tím opět dochází ke změně velikosti a orientace do směru pole. Díky velmi pevné vazbě molekul, je možné zanedbat tepelný pohyb dipólu a tím je možné říci, že je tato polarizace teplotně nezávislá. Stejně jako iontová je i tato polarizace bezeztrátová. Doba ustálení se shoduje s iontovou polarizací. [1]

Relaxační polarizace

Relaxační polarizace se značně liší od předešlých deformačních polarizací. Do této skupiny polarizací spadá relaxační iontová polarizace a relaxační dipólová polarizace. Tato skupina polarizací typická pro své relaxační pochody v dané látce. U pevných dielektrik jsou slabě vázané ionty přítomné poblíž defektů krystalické struktury. Na rozdíl od předchozí skupiny polarizačních mechanismů jsou relaxační polarizace velmi závislé na teplotě a je nutné zdůraznit, že jsou ztrátové. Hlavní příčinou je chaotický tepelný pohyb nosičů nábojů v látce. V případě přiloženého elektrického pole se v látce vytvoří nesymetrie a jednotka objemu látky dostane dipólový moment. Natočení dipólových momentů ve směru orientace pole brání již zmíněný vlastní tepelný pohyb nosičů náboje. Navýšením teploty se zvýší i bránící tepelný pohyb nosičů. Celý proces nenastane okamžitě. Doba ustálení je 10^{-12} až 10^{-8} . V porovnání je podstatně delší i vzdálenost posunutí dipólů než u pružných polarizací. Hlavní parametr relaxačních polarizací je časová konstanta přechodového děje τ používaná jako relaxační doba. [1]

Iontová relaxační polarizace

Vyskytuje se v dielektrikum tvořených z iontů nebo skupin molekul obsahující volné ionty příměsí a nečistot. Ty jsou slabě vázané s vedlejšími (sousedními) stavebními částicemi látky. Slabá vazba je hlavním důvodem iontů snadněji reagovat na působení vnějšího elektrického pole. Většinou jde o amorfní látky, kde je typickým zastupitelem anorganické sklo s iontovou vazbou nebo také anorganické krystalické látky. Jejich iontová vazba má však

netěsné uložení částic. Iontovou relaxační polarizaci lze matematicky popsat modelem dvojité potenciálové jámy. Vzhledem k relaxační době nutné k ustálení mechanismu je polarizace frekvenčně závislá a v neposlední řadě jde o polarizaci velmi teplotně závislou. [1]

Dipólová relaxační polarizace

Převážně se objevuje u polárních látek, kde dipólové molekuly nejsou téměř vůbec vázány a tím dochází k velmi snadnému natočení dipólových momentů ve směru orientace vnějšího pole. V některé literatuře se také nazývá tepelná orientační polarizace. Orientace dipólových momentů je ve struktuře zcela náhodná a chaotická. Začneme-li působit na látku vnějším elektrickým polem, vznikne v objemu látky energetická změna. Ustálený stav je charakterizován nerovnoměrnému rozmístění dipólových momentů. Znovu se jedná o polarizaci ztrátovou, která je velmi závislá na teplotě a na frekvenci. [1]

Zvláštní polarizace – migrační a pontánní

Migrační polarizace se vyskytuje u dielektrik obsahující makroskopické nehomogenity. Tím jsou myšleny vzduchové bublinky, praskliny, dislokace, nečistoty a jiné strukturální poruchy. U migrační polarizace se mohou účastnit volné nosiče náboje nebo slabě vázané náboje. Nehomogenity vytváří rozhraní prostředí, na kterých se nosiče nábojů zachytí. Rozhraní prostředí má odlišnou permitivitu i elektrickou vodivost. Volné nosiče náboje se při jejich migraci zachytí na zmíněném rozhraní nehomogenního prostředí. Tím se z nahromaděných volných nosičů stávají vázané, a proto migrace volných nábojů v materiálu dielektrika způsobí prostorový náboj. Migrační polarizace je nelineární a řadí se mezi ztrátové a nepružné. [1]

Tato polarizace je hlavně přítomna u feroelektrických látek. Ty jsou charakterizovány vlastní doménovou strukturou látky. Domény jsou velmi malé oblasti, ve kterých jsou všechny částice samovolně polarizovány díky působení vnitřních výměnných sil. Materiál se celkově jeví neutrálně. Přiložením vnějšího elektrického pole dochází k natočení domén do směru působícího pole. [1]

1.4 Elektrická vodivost

U ideálních izolantů se elektrická vodivost neprojeví. Tento jev se vyskytuje ve struktuře reálných izolantů a úzce souvisí s pohybem elektrického náboje. Mechanismus vodivosti hlavně záleží na skupenství látek a typech nosičů elektrického náboje. Elektrickou vodivost lze rozdělit podle nosičů nábojů na elektronovou (v elektrických polích o hodnotě 10^1 až 10^2 [kV/mm] nebo za vyšších teplot) a iontovou (ionty vlastní látky, příměsí nebo nečistot). Zpravidla převládá jen jeden z mechanismů. Za normálních podmínek převládá iontová elektrická vodivost. Dosud byla elektrická vodivost vnímána jako vnitřní (objemová). [1, 3, 4]

U pevných látek se uplatňuje také povrchová vodivost. Příčinou je voda absorbovaná na povrchu tuhého izolantu a díky disociaci molekul nečistot, vznikají volné nosiče náboje, které se pohybují po povrchu. Jestliže zvýšíme koncentraci vlhkosti působící na daný materiál, zvýší se jeho povrchová konduktivita. Výrazněji se projeví povrchová vodivost u polárních látek, kde jsou molekuly vody přitahovány větší silou k molekulám polární látky, než jsou přitažlivé síly mezi molekulami vody. U nepolárních látek je povrchová vodivost malá, protože se voda nerozlije a usadí se ve formě malých oddělených kapiček. Povrchová vodivost se nejvýznamněji projevuje u skel. [1, 3, 4]

Velikost povrchové vodivosti ovlivňují tyto faktory:

- Relativní vlhkost působící na dielektrikum
- Schopnost dielektrika odpuzovat nebo vázat vodu
- Čistota a hladkost povrchu dielektrika

1.5 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou klíčovou vlastností izolantů. Změnu energie v dielektriku lze nazvat jako dielektrické ztráty. Jedná se o proces přeměny části energie na teplo. Ztráty se objevují, jak ve střídavém, tak i ve stejnosměrném poli. Vznik dielektrických ztrát je dán pohybem volných a vázaných nosičů elektrického náboje, který se vyskytuje v materiálu. Mechanismus vzniku dielektrických ztrát je závislý na mnoha faktorech, mezi které patří: chemické složení, skupenství, struktura, koncentrace příměsí a nečistot. Ztráta energie je úzce spojena s elektrickou vodivostí dielektrika a s některými druhy polarizací. Dielektrické ztráty

jsou hlavní příčinou změny fázového posuvu mezi proudem a napětím. Hodnota celkových ztrát v dielektriku je dána sumou více druhů ztrát, které ve výsledném pohledu na dielektrikum působí souhlasně. Rozdělení ztrát v dielektriku dle fyzikální podstaty: vodivostní ztráty, polarizační ztráty a ionizační ztráty. [1, 3, 7]

1.5.1 Vodivostní ztráty

Tyto ztráty vznikají vlivem vodivostního proudu, který protéká skrze dielektrikum. U pevného dielektrika nesmíme zapomenout na vliv proudu tekoucího po povrchu materiálu. Tyto proudy se nacházejí u všech dielektrických materiálů a z hlediska uplatnění v praxi je klíčová velikost konduktivity zkoumaného dielektrika. Se zvýšením konduktivity dielektrika rostou vodivostní ztráty. Vlastní tepelný pohyb (kmitavý) vázaných nosičů nábojů, tvoří strukturu látky. Tento rovnovážný děj je narušen přiložením vnějšího střídavého pole. Hlavní fyzikální podstata je v tom, že vznikají srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími vázanými náboji látky. Důsledkem je opoždění vázaných nábojů za změnami působení elektrického pole, vznik Jouleových ztrát a tepelná degradace materiálu. [1, 7]

1.5.2 Polarizační ztráty

Polarizační ztráty mají hlavní podíl na celkové velikosti ztrát. U elektronové a iontové polarizace prakticky nevznikají žádné energetické ztráty. Naopak je tomu u dipólové a iontové relaxační polarizace, kde vznikají energetické ztráty pomocí elektrického střídavého pole. Existují tři druhy závislostí dielektrických ztrát na intenzitě působícího střídavého elektrického pole za jednu periodu. První typ závislosti je lineární, která se vyznačuje u bezztrátových dielektrik s deformačními polarizacemi. Druhý typ závislosti má tvar elipsy, která vzniká u dielektrik s deformačními i relaxačními polarizacemi. Obsah elipsy je úměrný velikosti ztracené energie. Třetí typ závislosti má tvar hysterezní smyčky, která vzniká u feroelektrik v oblasti teplot pod Curieovo bodem. I zde je obsah hysterezní křivky úměrný velikosti ztracené energie. Zajímavý druh ztrát je vznikající u feroelektrických látek. Mají specifickou vnitřní doménovou strukturu. Rezonanční ztráty lze také přiřadit do skupiny polarizačních ztrát. Rezonanční ztráty se v dielektriku projevují až při kmitočtech v oblasti světelného spektra a jsou specifické svou silnou selektivností při dané frekvenci. [1, 7]

1.5.3 Ionizační ztráty

Jedná se o ztráty částečnými výboji. Vyskytují se převážně u kapalných nebo tuhých materiálů, které obsahují malé plynové dutinky nebo jiné nehomogenity. Jestliže zvýšíme napětí na takzvané počáteční, vznikají výbojové činnosti. V dutinkách nehomogenního materiálu vznikají částečné výboje. Ty jsou způsobeny prudkým vzrůstem ionizace v dutinkách, kde dochází k zapálení výboje. Důsledkem částečných výbojů je prudký nárůst teploty v okolí dutinek. Částečné výboje mají také abrazivní a chemické účinky. Vzniká degradace materiálu a tím dochází k nevratnému zhoršení dielektrických vlastností materiálu. [1, 7]

1.5.4 Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli

V případě působení stejnosměrného pole hlavní velikost vodivostního proudu. Hodnota vodivostního proudu je úměrná velikosti dielektrických ztrát. Jedná se tedy o Joulovy ztráty, které jsou závislé na izolačním odporu materiálu. Mohou se zde uplatnit i ionizační ztráty jsou však v porovnání s vodivostními ztrátami zanedbatelné. [1, 3]

1.5.5 Dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli

V případě působení střídavého pole jsou celkové dielektrické ztráty vyjádřeny součtem vodivostních, polarizačních a ionizačních ztrát. Obecně platí pro tyto ztráty, že jsou podstatně větší oproti ztrátám způsobeným stejnosměrným polem. Ztráty vznikají při jakémkoli průběhu napětí, ale při vyjádření ztrát je nutné předpokládat, že přiložené napětí má přesný sinusový průběh a zkoumaný materiál je homogenní. Relativní permitivita je v dielektriku rovnoměrně rozložená (konstantní) a vzniklé procesy v dielektriku lze považovat za lineární. [1, 3]

1.5.6 Dielektrické ztráty v pevných izolantech

V předchozím textu jsme při vyjádření ztrát předpokládali, že jde o homogenní izolanty. V praxi jsou z velké části používané izolanty nehomogenní. Nehomogenita materiálu je nežádoucí jev, který může vznikat v průběhu výroby, při zpracování daného materiálu nebo vlivem aplikace v provozu. Další používané materiály (vrstvené a kompozitní) mají vlastní nehomogenitu danou vnitřní skladbou materiálu. U těchto materiálů dochází ke značnému navýšení dielektrických ztrát. Mohou zde vzniknout prostorové náboje spojené s migrační

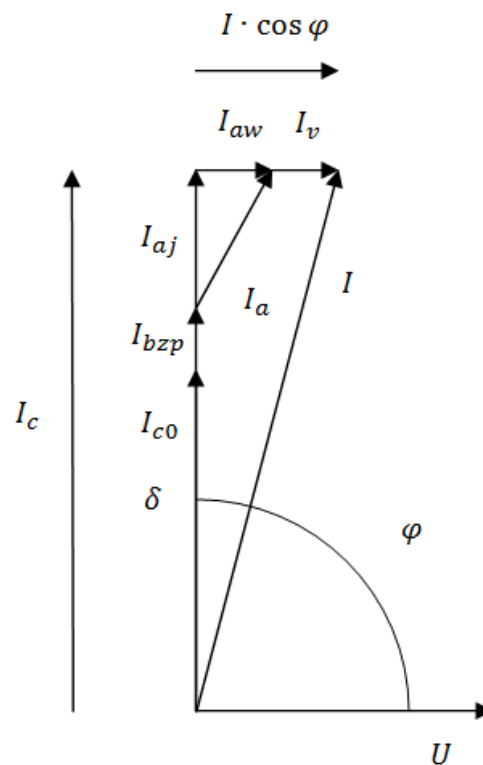
polarizací. Jestliže je nehomogenní materiál tvořen bublinkami zaplněnými plynem, mohou vznikat při zvýšeném elektrickém namáhání částečné výboje spojené s ionizačními ztrátami. [1]

1.5.7 Ztrátový činitel

Základní parametrem při řešení dielektrických ztrát způsobených střídavým elektrickým polem je velikost ztrátového úhlu δ [°]. Jedná se o doplňkový úhel do 90° k úhlu fázového posunu φ , kde časově vektor proudu předbíhá vektor napětí. Z fázorového digramu je patrné, že se úhel φ vypočte:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta \quad (1.7)$$

δ udává velikost ztracené energie, která se v materiálu přemění v teplo.

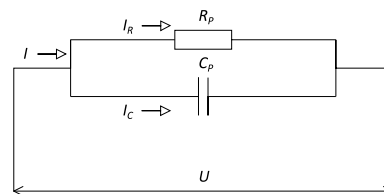


Obr. 1.6: Fázorový diagram reálného dielektrika

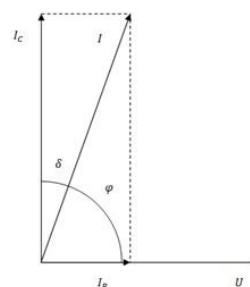
Kapacitní proudová složka I_{c0} nabíjí geometrickou kapacitu měřeného dielektrika C_0 . Nabíjecí proud I_{bzp} odpovídá rychlým deformačním bezztrátovým polarizacím (elektronové a iontové). Pomalé ztrátové polarizace odpovídají absorpčnímu proudu I_a , který se následně dělí ztrátovou složku proudu I_{aw} a bezztrátovou složku proudu I_{aj} . Těto složce absorpčního proudu odpovídá C_p , která navyšuje geometrickou kapacitu C_0 . Ztrátová složka absorpčního proudu I_{aw} se shoduje z energetickými ztrátami v dielektriku. Vodivostní proud I_v je příčinou vzniku vodivosti v technickém dielektriku a má shodnou fázi jako přiložené napětí. Pro vyjádření dielektrických ztrát se v praxi běžně využívá $tg \delta$ známý jako ztrátový činitel. Ztráty je možné zároveň vyjádřit pomocí ztrátového výkonu. [1, 4]

1.5.8 Náhradní obvody dielektrika

Reálné technické dielektrikum lze pro určení výpočtu ztrátového výkonu P_z [W] nebo ztrátového činitele $tg \delta$ nahradit ekvivalentními obvody. Zapojení obvodů spočívá v paralelní (Obr. 1.7) nebo sériové () kombinaci prvků, které charakterizují určité nebo nulové ztráty. Teoreticky nezáleží na druhu ekvivalentního obvodu. Činný výkon a fázový úhel obvodu by měl být ekvivalentní ztrátovému výkonu a zároveň fázovému úhlu daného dielektrika. Sériový a paralelní náhradní obvod musí mít mezi svorkami shodnou impedanci. Ztráty vznikající v reálném dielektriku jsou v ekvivalentním obvodu vyjádřeny přiřazeným rezistorem. [1]



Obr. 1.7 Paralelní náhradní zapojení dielektrika

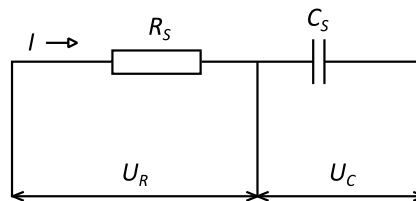


Obr. 1.8: Fázorový diagram pro paralelní zapojení

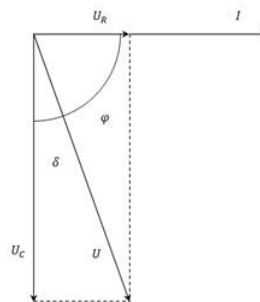
Pro paralelní náhradní zapojení platí vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} \quad (1.8)$$

$$P_Z = U^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.9)$$



Obr. 1.9: Sériové náhradní zapojení dielektrika



Obr. 1.10: Fázorový diagram pro sériové zapojení

Pro sériové náhradní zapojení platí vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot R_S \cdot C_S \quad (1.10)$$

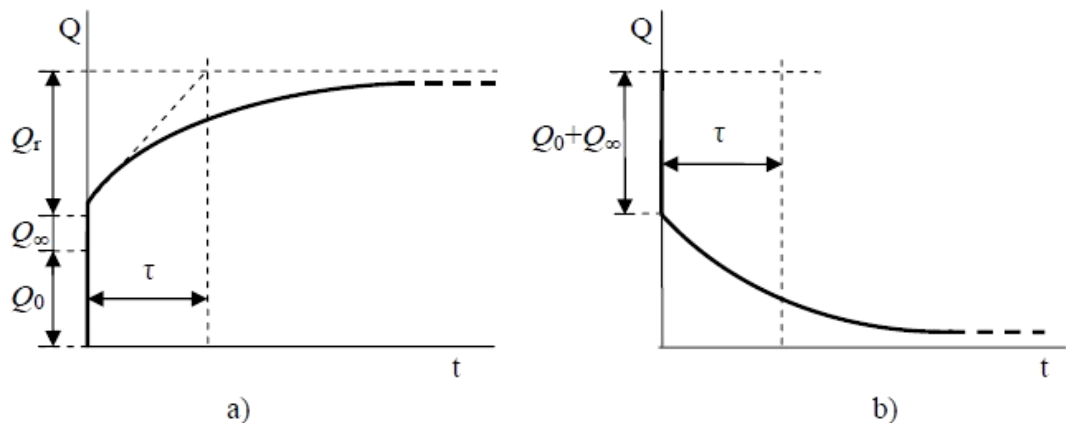
$$P_Z = U^2 \cdot \omega \cdot C_S \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (1.11)$$

Obě náhradní schémata se nepatrně liší jen pro nízké hodnoty ztrátového činitele. U dielektrik s vysokými ztrátami se rozdíl mezi schémata značně zvětší. Rozdíly mezi schémata je myšleno z pohledu interpretace fyzikální podstaty dielektrických ztrát. Paralelní náhradní schéma je ideálním modelem pro ztráty v reálném kondenzátoru podmíněných elektrickou vodivostí příslušného dielektrika v širším kmitočtovém pásmu. U paralelního obvodu se zvýšením kmitočtu klesá ztrátový činitel (při stejné teplotě). Sériové náhradní schéma je ideálním modelem pro kondenzátor, ve kterém vznikají ztráty primárně odporem přívodů a

elektrod, zatímco materiál dielektrika nemá téměř žádné ztráty. V technické praxi lze k rychlému a zjednodušenému posouzení kvality dielektrika využít ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$. Jestliže je hodnota ztrátového činitele menší než 10^{-3} jedná se o dobrý elektroizolační materiál, pokud je hodnota $\operatorname{tg} \delta$ vyšší než 10^{-2} jedná se o špatný elektroizolační materiál. [1]

1.6 Dielektrická absorpce

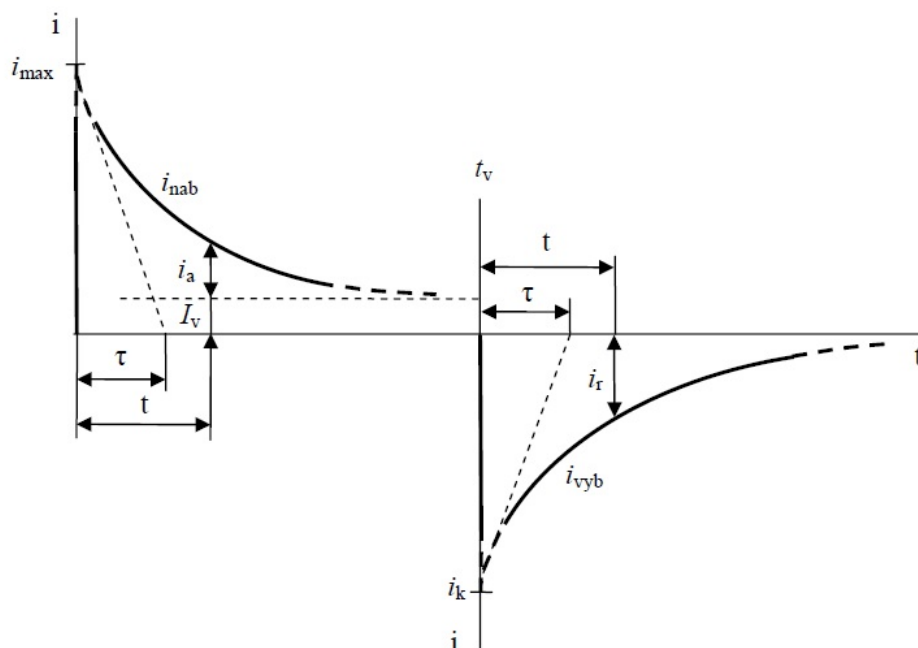
Názvem dielektrická absorpce si lze představit mnoho složitých nestacionárních dějů, které je možné sledovat v reálném dielektriku kondenzátoru a to v případě připojeného zdroje stejnosměrného napětí. Zmíněný kondenzátor se nenabije hned po připojení zdroje, ale nabije se s určitou časovou prodlevou. Shodným způsobem probíhá také vybíjení kondenzátoru. Základní příčinou absorpce jsou dielektrické relaxační polarizace. Relaxační polarizace jsou pomalé a mají za následek určité zpoždění odezvy dielektrika na zahájení působení elektrického stejnosměrného pole. [1]



Obr. 1.11: Časový průběh kondenzátoru (a) nabíjení (b) vybíjení

Ve čtyřech fázích lze sledovat kondenzátor s reálným dielektrikem při jeho nabíjení (Obr. 1.11 a). V první fázi okamžitě přiteče na elektrody kondenzátoru náboj Q_0 [C], kterým se nabíjí geometrická kapacita C_0 [F]. Ve druhé fázi přiteče náboj se zpožděním (10^{-16} až 10^{-12}), který odpovídá (rychlým) pružným polarizacím. Ve třetí fázi pomalu přitéká na elektrody absorpční náboj $Q_r(t)$ [C], který je charakterizován (pomalými) relaxačními polarizacemi. Po ustálení polarizačních procesů, protéká v poslední fázi dielektrikem kondenzátoru jen vodivostní proud i_v [A]. Opačný proces je vybíjení kondenzátoru, které je možné pozorovat na obrázku (Obr. 1.11 b).

Každý reálný izolant obsahuje mnoho vázaných elektronů, ale i volné elektrony v zanedbatelném množství. Působením stejnosměrného pole se vychýlí vázané elektrony ze svých rovnovážných pozic na určitou vzdálenost, kterou kompenzuje síla vázící náboj do rovnovážné pozice. Pokud nastane změna intenzity elektrického pole, vznikne následující nové vychýlení vázaných elektronů. [1]



Obr. 1.12: Časový průběh proudu v daném dielektriku při počátku působení stejnosměrného pole a po ukončení působení

Obrázek (Obr. 1.12) popisuje nabíjecí a vybíjecí proudy dielektrika kondenzátoru. Hodnota maximálního nabíjecího proudu i_{max} [A] je dána vnitřním odporem zdroje, odporem přívodů R_0 [Ω] k dielektriku a velikostí napětí zdroje U [V]. Jakmile se nabije geometrická kapacita C_0 tímto proudem, začne se tvar křivky prudce snižovat s určitou časovou konstantou $\tau_0 = R_0 C$, potom C [F] vyjadřuje kapacitu daného kondenzátoru. Po doznění maximálního proudu i_{max} [A] obvodem protéká nabíjecí proud i_{nab} [A], pro který platí vztah:

$$i_d(t) = i_a(t) + i_v(t) \quad (1.12)$$

Důsledkem pohybu vázaných nosičů nábojů je absorpční proud $i_a(t)$ [A] časově závislá složka dobíjecího proudu. Absorpční proud je dán součtem proudů odpovídajícím jednotlivým relaxačním polarizacím. Struktura a stav dielektrického materiálu ovlivňuje strmost klesajícího absorpčního proudu. Naměřením absorpčního proudu je tedy možné zjistit stav dané izolace. Hodnota vodivostního proudu $i_v(t)$ [A] je časově závislá u porušené nebo zvlhlé izolace, kde se znatelně projevuje iontová vodivost. V případě suchého a neporušeného izolantu je vodivostní proud velmi malý a časově nezávislý. Vybíjecí proud i_k vznikne v čase t_v [s], kdy současně dojde k odpojení zdroje elektrického napětí a k vyzkratování elektrod. Resorpční proud $i_r(t)$ [A] je opačný proces absorpčního proudu. Jelikož se část náboje vyrovnala svodovými cestami v izolantu, neplatí rovnost mezi proudy $i_a(t)$ a $i_r(t)$. [1]

1.6.1 Polarizační indexy

Pro zjištění stavu dielektrika se v praxi běžně využívá časová závislost absorpčních proudů. Poměr absorpčních proudů v určitých časových okamžicích se nazývá polarizační index p_i [-]. Dobré izolační materiály mají nízký vodivostní proud. Dominující absorpční proud potom výrazně navýší polarizační index na hodnoty (3-7). U zvlhlé nebo porušené izolace se polarizační index blíží k jedné. [1]

Pro minutový polarizační index platí vztah:

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad (1.13)$$

Další využívaný polarizační index je desetiminutový pro který platí vztah:

$$p_{i10} = \frac{i_{60}}{i_{600}} = \frac{i_{a60} + i_{\infty}}{i_{a600} + i_{\infty}} \quad (1.14)$$

kde R_{15}, R_{60}, R_{600} [Ω] jsou elektrické odpory v 15, 60 sekundě a 10 minutě od přiloženého zdroje stejnosměrného napětí, $i_{a15}, i_{a60}, i_{a600}$ [A] jsou absorpční proudy odpovídající 15, 60 sekundě a 10 minutě. i_{∞} [A] jsou vodivostní ustálené proudy.

1.6.2 Vnitřní a povrchová rezistivita

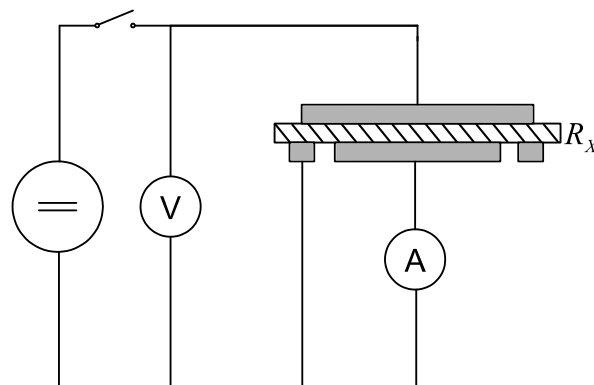
Měrný elektrický odpor udává možnost hodnocení materiálu z hlediska elektrické vodivosti přepočítaný na jednotku objemu. Měrný elektrický odpor se také nazývá rezistivita a značí se ρ [$\Omega \cdot m$]. Měrná elektrická vodivost se nazývá konduktivita a značí se γ [$S \cdot m^{-1}$]. Pro vzájemný vztah veličin platí:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1.15)$$

Pro měření odporu se používají přímé a porovnávací metody. V experimentální části byla použita nejpoužívanější přímá voltampérová metoda. Schéma zapojení je možné vidět na obrázku níže (Obr. 1.13). Pro výpočet neznámého izolačního odporu R_x [Ω] je nutné znát hladinu stejnosměrného zdroje napětí a proud protékající vzorkem. Použitý ampérmetr by měl mít pro dobré izolanty citlivost alespoň 10^{-16} . Neznámý odpor lze vypočítat vztahem:

$$R_x = \frac{U}{I_x} \quad (1.16)$$

Pro dosažení správné velikosti měrného elektrického odporu je nutné provést přepočet na daný rozměr zkoušeného vzorku. Pouze na základě izolačního odporu nelze vzájemně jednotlivá dielektrika porovnávat, jestliže rozměry vzorků materiálu se liší. Ovšem podle velikosti hodnot rezistivity toto porovnání možné je. [1, 8]



Obr. 1.13: Zapojení elektrod pro měření vnitřní rezistivity voltampérovou metodou [8]

Přepočet plochy pro vnitřní rezistivitu a kruhové elektrody je dán vztahem:

$$A = \frac{\pi(d_1 + g)^2}{4} \quad (1.17)$$

kde A [m²] je efektivní plocha měrné elektrody, d_1 [m] je průměr měrné elektrody a g [m] je vzdálenost mezi elektrodami.

Přepočet obvodu pro povrchovou rezistivitu a kruhové elektrody je dán vztahem:

$$p = \pi(d_1 + g) \quad (1.18)$$

Vnitřní rezistivita materiálu je rovna poměru intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty ustálené uvnitř elektroizolačního materiálu. Vnitřní rezistivitu lze vyjádřit vztahem:

$$\rho_v = R_x \cdot \frac{A}{h} \quad (1.19)$$

kde ρ_v [$\Omega \cdot \text{m}$] je vnitřní rezistivita a h [m] je průměrná tloušťka měřeného vzorku.

Povrchová rezistivita materiálu je rovna poměru intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty na povrchu vzorku. Povrchovou rezistivitu lze vyjádřit vztahem:

$$\rho_p = R_x \cdot \frac{p}{g} \quad (1.20)$$

2 Experimentální část

V první části experimentu bylo provedeno měření vzorků ve střídavém elektrickém poli na impedančním spektrometru. Pomocí spektrometru byly naměřeny teplotní a frekvenční závislosti. Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy.

V druhé části experimentu bylo provedeno měření vzorků ve stejnosměrném elektrickém poli. V této části byly naměřeny absorpční proudy, pomocí kterých bylo možné dopočítat polarizační indexy, vnitřní a povrchovou rezistivitu.

2.1 Popis měřených materiálů

Pro správné měření bylo nutné vytvořit vzorky přesně daných rozměrů. Vzorky pro měření na frekvenčním analyzátoru byly vystřiženy na rozměr 35x35mm. Důvodem byly použité elektrody o průměru 30mm. Vzorky pro měření absorpčních proudů byly vystřiženy na rozměr 100x100mm dle normy. Od výrobce byly k dispozici materiály rozdílných parametrů. Materiály vzorků tvořily 3 matrice a rozdílným hmotnostním zastoupením plniva. Matrice byly plněné nanotrůbkami aluminosilikátového charakteru spadající do skupiny kaolinitu. Materiály matric A a B byly z lineárního nízko hustotního polyetyleny LLDPE s rozdílných blíže neurčených specifikací s hustotou pohybující se kolem hodnoty 918 kg/m³. Materiál matrice C byl z vysoko hustotního polyetyleny označován HDPE s hustotou 956 kg/m³. Polyetylen obecně patří do skupiny termoplastů. Všechny měřené vzorky obsahovaly stejné množství katalyzátoru. V tabulce (*Tab. 1*) je vidět rozdělení vzorků podle druhu matric a podle zastoupení plniva v materiálu.

Tab. 1: Tabulka měřených vzorků

Vzorek 1	Hm [%]	Vzorek 2	Hm [%]	Vzorek 3	Hm [%]
Matrice A	94	Matrice B	94	Matrice C	94
Plnivo	1	Plnivo	1	Plnivo	1
Katalyzátor	5	Katalyzátor	5	Katalyzátor	5
Vzorek 4	Hm [%]	Vzorek 5	Hm [%]	Vzorek 6	Hm [%]
Matrice A	92	Matrice B	92	Matrice C	92
Plnivo	3	Plnivo	3	Plnivo	3
Katalyzátor	5	Katalyzátor	5	Katalyzátor	5
Vzorek 7	Hm [%]	Vzorek 8	Hm [%]	Vzorek 9	Hm [%]
Matrice A	88	Matrice B	88	Matrice C	88
Plnivo	7	Plnivo	7	Plnivo	7
Katalyzátor	5	Katalyzátor	5	Katalyzátor	5

2.2 Dielektrická spektroskopie

První experimentální část se zabývá dielektrickou spektroskopií. Je to diagnostická metoda pro elektroizolační materiály. Jedná se o nedestruktivní měřicí metodu, která slouží ke sledování molekulární dynamiky zkoumaných materiálů. Hlavním postata dielektrické spektroskopie je zaznamenání odezvy nosičů nábojů v materiálu, které jsou závislé na změně vnějšího elektrického pole a teplotě. Využívá se tam, kde často dochází k určitým změnám elektrických dipólů nebo také k jejich vzájemné interakci. Dielektrická spektroskopie se může využít při návrhu dielektrického materiálu pro elektrotechnické aplikace.

2.2.1 Použité měřicí zařízení

Měření probíhalo na frekvenčním analyzátoru Alpha-A (Novocontrol) a Quatro Cryosystem (Novocontrol). Součástí analyzátoru byl aktivní elektrodový systém ZGS. Quatro cryosystem obsahoval: kryostat (BDS1100), regulátor teploty a tlaku (DBS 1330), dva napájecí stabilizované zdroje (DBS 1340), modul kompenzátoru objemu (BDS 1320) a vakuovou pumpu (BDS 1350). Pomocí vakuové pumpy se dostával dusík o teplotě -195 °C přes topnou spirálu až do kryostatu. Díky topné spirále bylo možné přesné nastavení požadované teploty působící na měřený vzorek. Počítač byl propojen přes rozhraní (IEEE488) a pomocí softwaru (WinDETA) probíhalo měření.



Obr. 2.1: Frekvenční analyzátor Alpha-A



Obr. 2.2: Části kryosystému

2.2.2 Postup měření

Vzorky byly před měřením vyčištěny lihem a nechaly se po dobu 24 hodin vyschnout. Jednotlivé vzorky o rozměru 35x35 mm byly umístěny mezi kruhové pozlacené elektrody o průměru 30 mm a výšce 2 mm. Při manipulaci byly používány látkové antistatické rukavice. Aktivní elektrodový systém byl vkládán do kryostatu. Měření byla provedena na frekvenčním analyzátoru Alpha-A a Quatro Cryosystem. Počítač byl použit pro záznam naměřených dat. Měřené parametry dielektrika byly hodnoceny s ohledem na jejich změny ve střídavém poli s efektivní hodnotou 1 V. Měření probíhala ve frekvenčním rozsahu od 1 Hz do 1 MHz a

s teplotním rozsahem od 0 °C do 100 °C. Z hlediska statistické významnosti byla tloušťka vzorků měřena pětkrát na pěti různých místech. Z těchto hodnot byla vypočtena střední hodnota. Tloušťka materiálu byla zapisována do softwaru před měřením, jako důležitý parametr.

2.2.3 Dosažené výsledky experimentu

Naměřené obrázky zachycují průběhy ϵ' , $tg\delta$, C_p závislé na teplotě a frekvenci.

Vyhodnocení teplotní závislosti vzorků:

Teplotní závislosti byly měřeny při průmyslové frekvenci 50 Hz. Při vyhodnocení permitivity u dielektrik je nejdůležitější maximum a minimum každé křivky. S rostoucí teplotou klesá hodnota relativní permitivity. Trend poklesu je dán druhem matrice a obsahem plniva v materiálu. Na níže uvedeném grafu (*Obr. 2.3*) je vidět rozdílnost ve strmosti klesání křivek, které charakterizují jednotlivé vzorky. Při pohledu na vzorky dosahuje maximální hodnoty vzorek 7. Teplotní závislost ϵ' se nejméně projevuje u vzorků (3, 6, 9) s matricí C (*Příloha 3*). Největší teplotní závislost ϵ' se nejvíce projevuje u vzorků (1, 4, 7) s matricí A (*Příloha 1*). Pokud vzorky budou porovnány v závislosti na obsahu plniva, trend pro matrice B a C je shodný. Tzn. Čím je více plniva v objemu materiálu, tím je menší závislost na teplotě. Nejvyšších hodnotu ϵ' dosáhl vzorek 7. Celkově nejnižší hodnotu ϵ' dosáhl vzorek 9 a tím je nevhodnější pro elektroizolační aplikace.

U vyhodnocení kapacity je důležité znát použití daného materiálu. V této práci jsou materiály vyhodnocovány, jako elektroizolační. Z rovnice (1.3) vychází souvislost mezi relativní permitivitou a kapacitou. Průběh kapacity je velmi podobný relativní permitivitě. Z pohledu kapacity je pro elektroizolační aplikace nevhodnější vzorek 9, který je nejméně závislý na teplotě a dosahuje nejnižší hodnoty. Z pohledu jednotlivých matric jsou rozdíly malé, a za nevhodnější lze považovat matrici A (*Příloha 7*).

Ztrátový činitel charakterizován rovnicí (1.6). Z hlediska hodnocení je nutné, aby ztrátový činitel byl co nejnižší (*Obr. 2.4*). Vzorky s vysokým obsahem plniva dosahují největších ztrát (*Příloha 6*). Čím je plniva méně, tím mají materiály menší ztráty. Celkově nejmenší ztráty má vzorek 1, který není téměř závislý na teplotě. V porovnání matric dosahuje

matrice B nejvyšších ztrát (*Příloha 2*), zatímco vzorky s matricí C dosahují nejnižších ztrát (*Příloha 3*). Vzorek 8 vykazuje nejvyšší ztráty.

Vyhodnocení frekvenční závislosti vzorku 3:

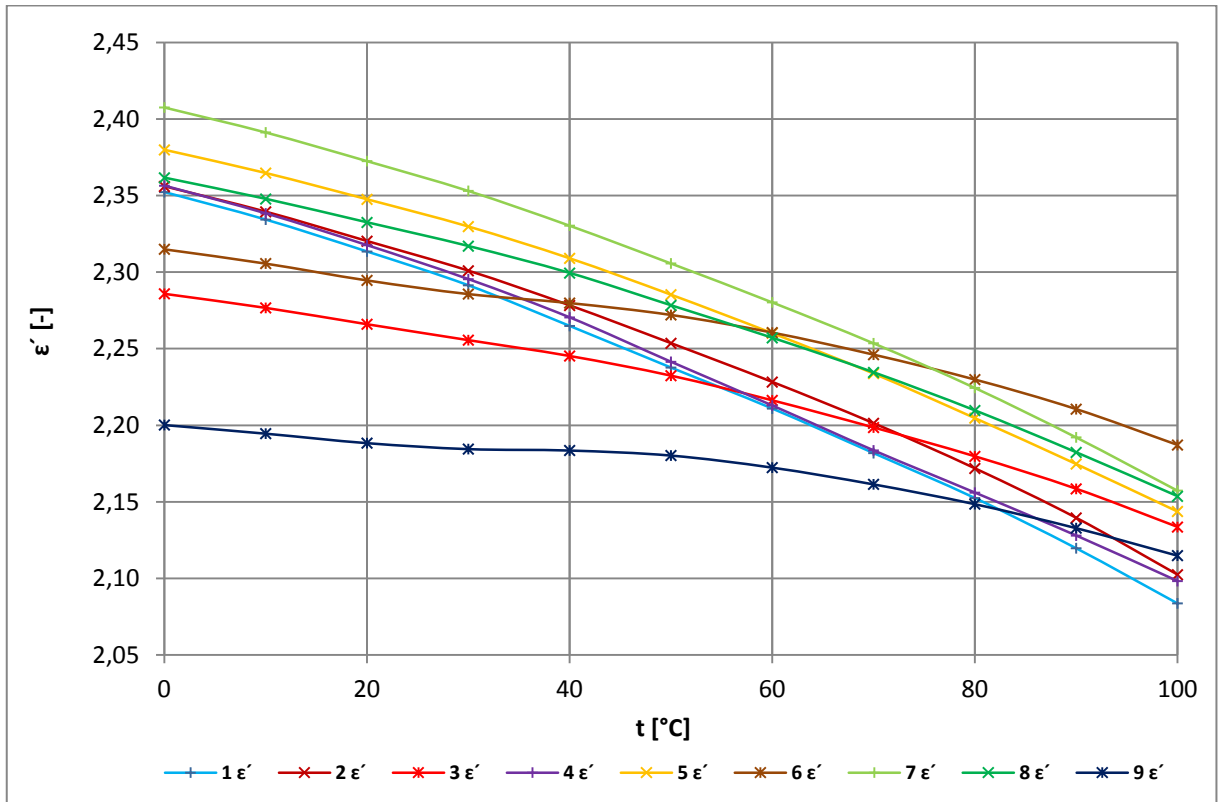
Na obrázku (*Příloha 25*) je frekvenční závislost ε' při teplotě 0 – 100 °C, ze kterého je patrný jednoznačný trend. Se zvyšující teplotou klesá relativní permitivita. Důvodem je zvyšující schopnost nosičů elektrického náboje sledovat změnu elektrického pole. Frekvenční závislost kapacity (*Příloha 27*) se velmi shoduje s relativní permitivitou. Průběhy jednotlivých teplot pozvolně klesají se zvyšující se frekvencí.

Průběhy odpovídající jednotlivým teplotám jsou značně složitější u ztrátového činitele (*Příloha 26*). Největší ztráty u měřeného materiálu se projevují při teplotě 80 a 90 °C. Zajímavostí je průběh ztrátového činitele při 100 °C, který nedosahuje takových ztrát. Se snižující teplotou je trend průběhu klesající a ztráty se snižují. Při frekvenci 10 kHz se teplota téměř neprojevuje na ztrátovém činiteli.

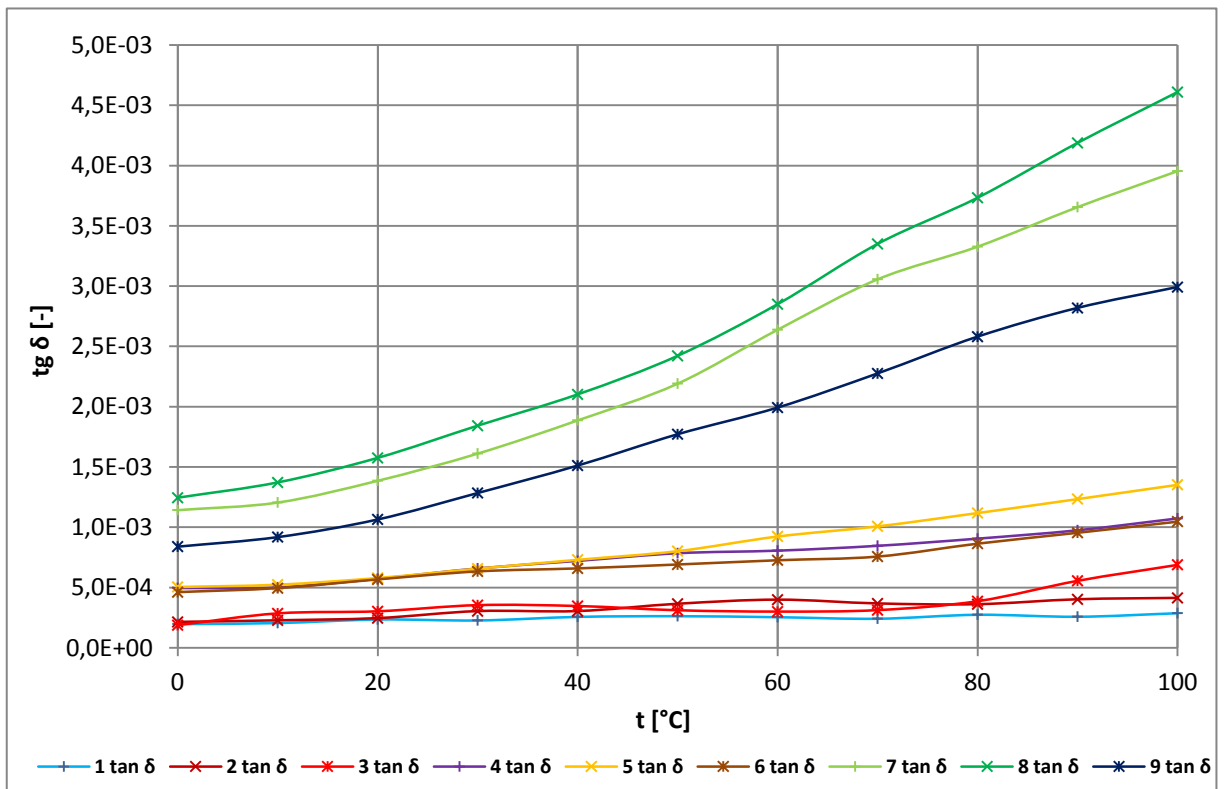
Vyhodnocení frekvenční závislosti, kde parametr je teplota (20 °C):

S rostoucí frekvencí klesá hodnota relativní permitivita. Trend poklesu je dán druhem matrice a obsahem plniva v materiálu. Na obrázku (*Příloha 13*) je vidět rozdílnost ve strmosti klesání křivek, které charakterizují jednotlivé vzorky matrice A. Při pohledu na obrázek dosahuje nejnižších hodnot vzorek 1. Trend pro matrici A platí, že čím má vzorek méně plniva tím je relativní permitivita nižší. U matrice C nelze tento trend potvrdit (*Příloha 15*), protože nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 9 s nejvyšším obsahem plniva. Z hlediska stejného zastoupení plniva a rozdílných matic dosahuje nejnižších hodnot matrice C. Z pohledu frekvenční závislosti na ε' je materiál vzorku 9 nejvhodnější pro elektroizolační aplikace. Z pohledu frekvenční závislosti na kapacitu je stejný výsledek, jako u teplotních závislostí. Z obrázku (*Příloha 24*) je viditelné, že vzorek 9 má nejnižší kapacitu.

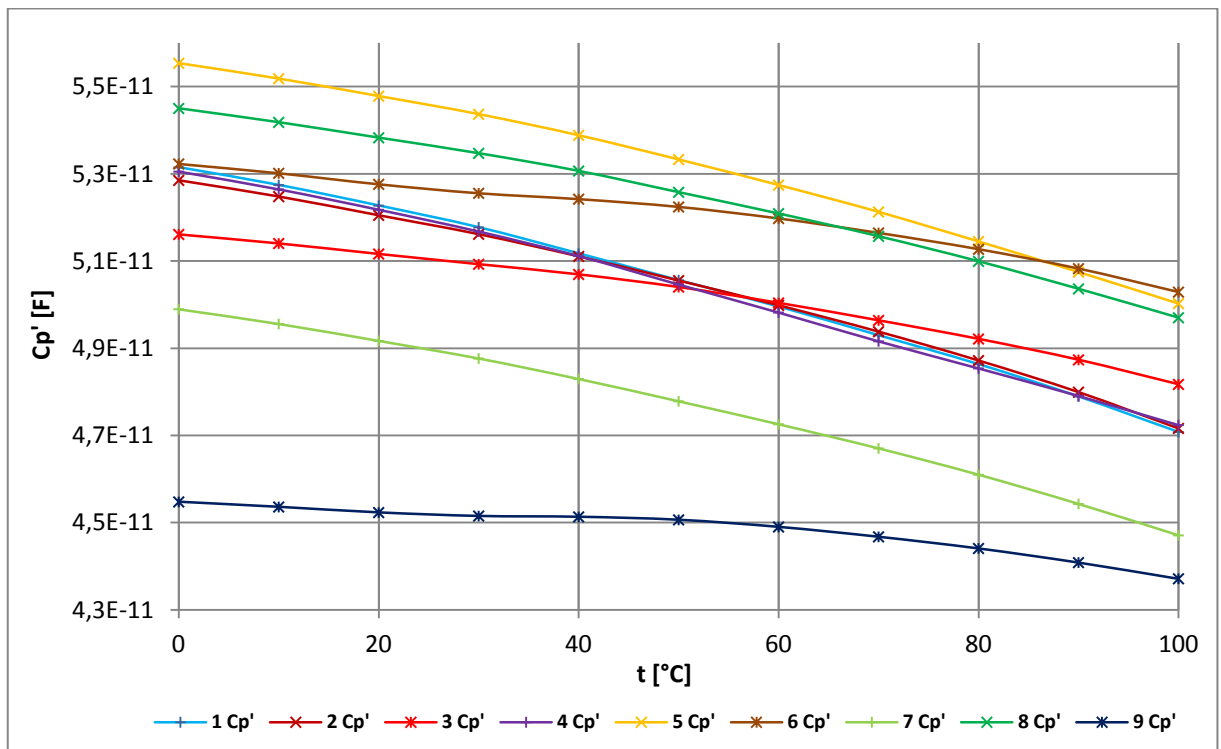
Pro ztrátový činitel platí, že čím je plniva více, tím mají materiály větší ztráty a jsou víc závislé na frekvenci. Z obrázku (*Příloha 16*) je viditelné, že při nízkém obsahu plniva má nejmenší ztráty matrice A.



Obr. 2.3: Teplotní závislost ϵ' permitivity všech měřených vzorků



Obr. 2.4: Teplotní závislost $\tan \delta$ všech měřených vzorků

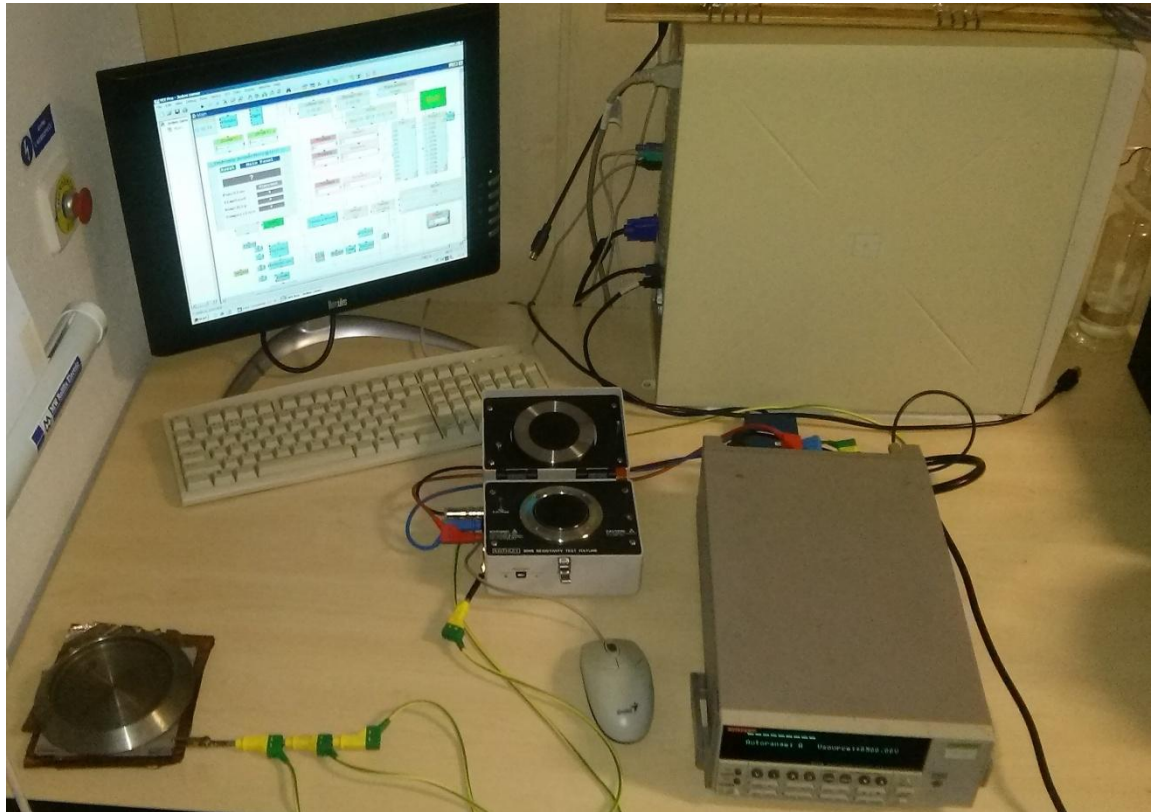
Obr. 2.5: Teplotní závislost Cp' všech měřených vzorků

2.3 Absorpční charakteristiky a z nich určované parametry

Druhá experimentální část byla věnována měřením absorpčním proudům a z nich určované parametry.

2.3.1 Použité měřící zařízení

Důležitý komponent celého měření byl upínací elektrodový systém (keithley model 8009). Zajišťuje dobré elektrostatické stínění a má dobrou elektroizolační odolnost. Je vybaven automatickým odpojením zdroje napětí při otevření víka. Dále umožňuje rovnoměrný tlak na vzorek a tím je docílena vyšší přesnost měření. Další zařízení byl zdroj napětí (keithley model 6517A), který zároveň měřil absorpční proud. Měření probíhalo při stabilizované hladině stejnosměrného napětí 500V.



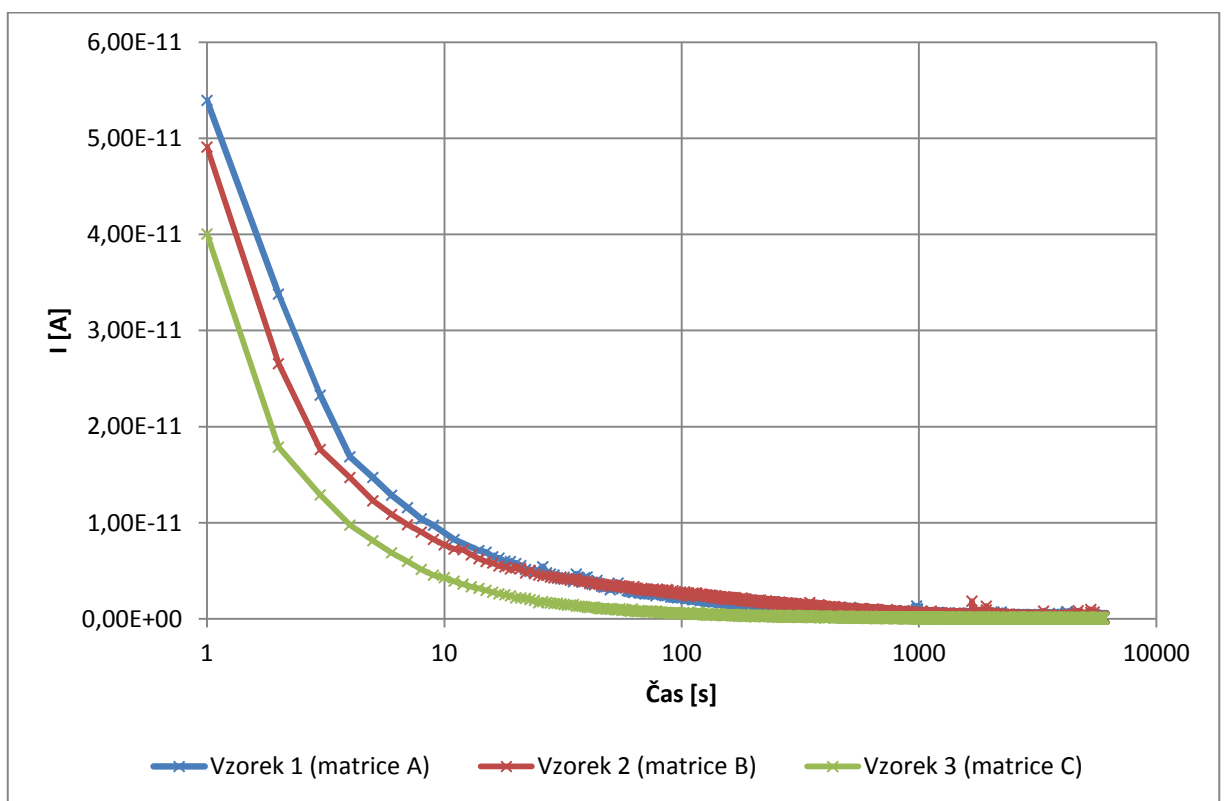
Obr. 2.6: měřící pracoviště pro měření absorpčních proudů

2.3.2 Postup měření

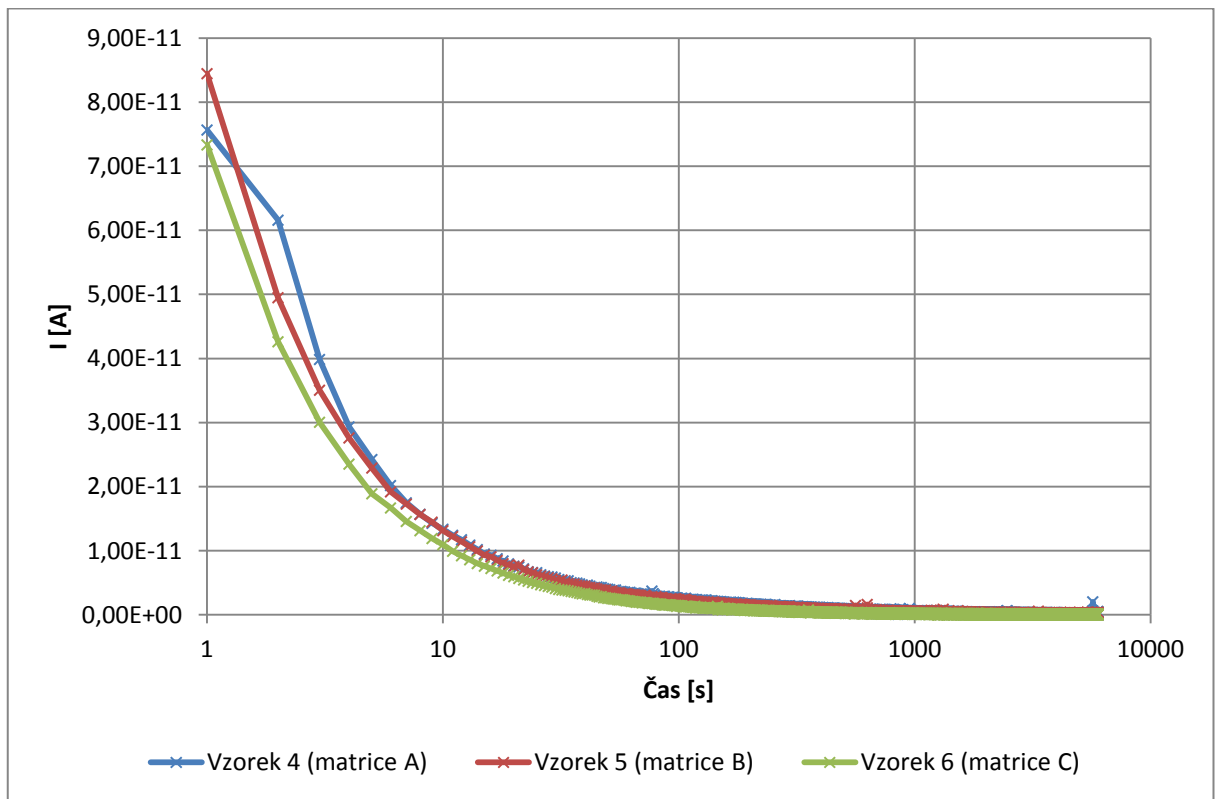
Nejprve byly naměřeny tloušťky vzorků pro určení vnitřní a povrchové rezistivity. Z hlediska statistické významnosti byla tloušťka vzorků měřena pětkrát na pěti různých místech. Pro výpočet rezistivity byla použita průměrná hodnota tloušťky. Vzorky materiálů byly vyčištěny lihem a nechaly se po dobu 24 hodin vyschnout. Druhý den byly vzorky vloženy na 24 hodin do uzemňovacích listů (zkratovací knížky). Při manipulaci se vzorky byly používány látkové antistatické rukavice, aby se minimalizovala možnost nabití vzorku. Pro jednotlivé měření byly vzorky vloženy do elektrodového systému. Měření vzorků probíhalo při pokojové teplotě. V počítači pomocí softwaru Agilent VEE pro 6.0 byly zaznamenány absorpční proudy. Každý vzorek byl měřen 100 minut s intervalem 1 sekundy. Měření absorpčního proudu probíhalo dle normy ČSN IEC 93.

2.3.3 Dielektrická absorpce

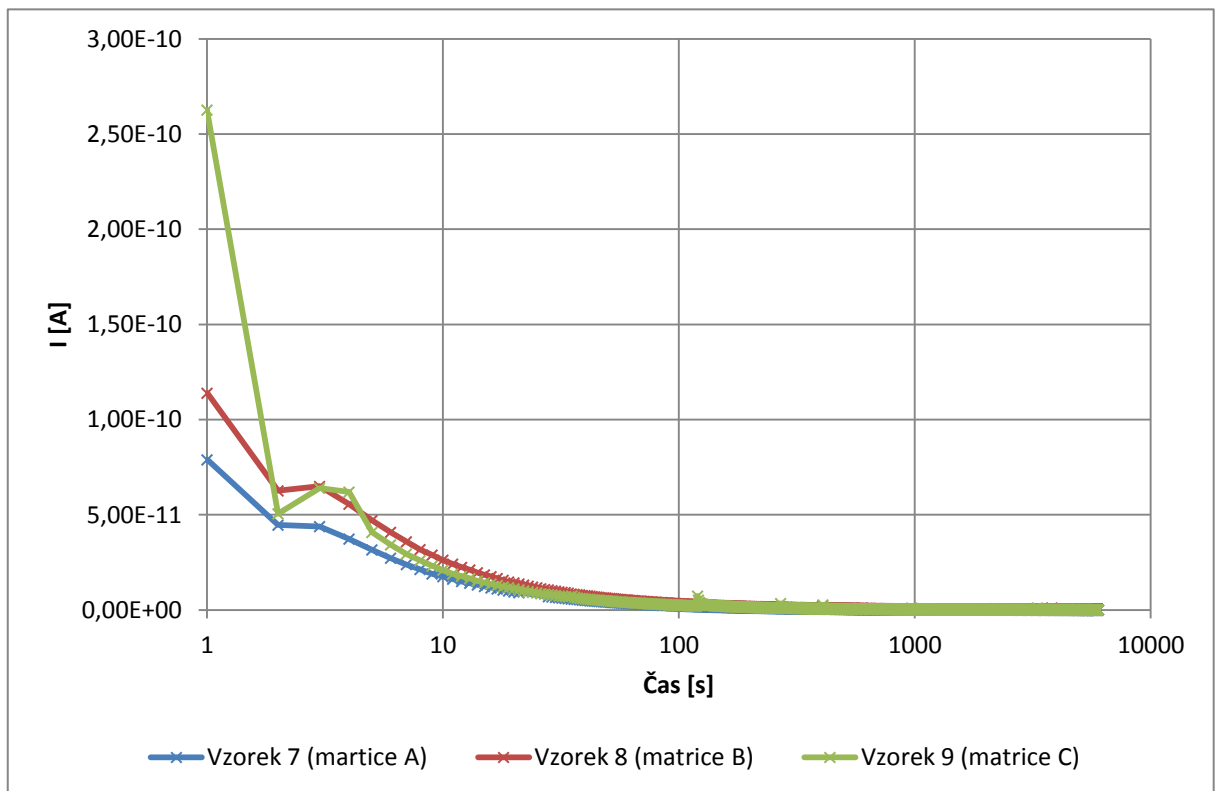
U dielektrické absorpce byly měřeny absorpční proudy v závislosti na čase. Z níže uvedených obrázků jsou viditelné rozdílné trendy průběhů závislé na množství plniva a použité matrici. Pro matrice platí úměrnost velikosti nabíjecího proudu s velikostí obsahu plniva. Čím je větší obsah plniva materiálu, tím je větší nabíjecí proud. Při obsahu plniva 1 a 3% je shodný trend průběhů, matrice C dosahuje nejnižších hodnot a matrice A nejvyšších. Specifický průběh nabíjecího proudu mají vzorky s největším obsahem plniva. Nejnižší hodnotu nabíjecího proudu dosáhl vzorek 3.



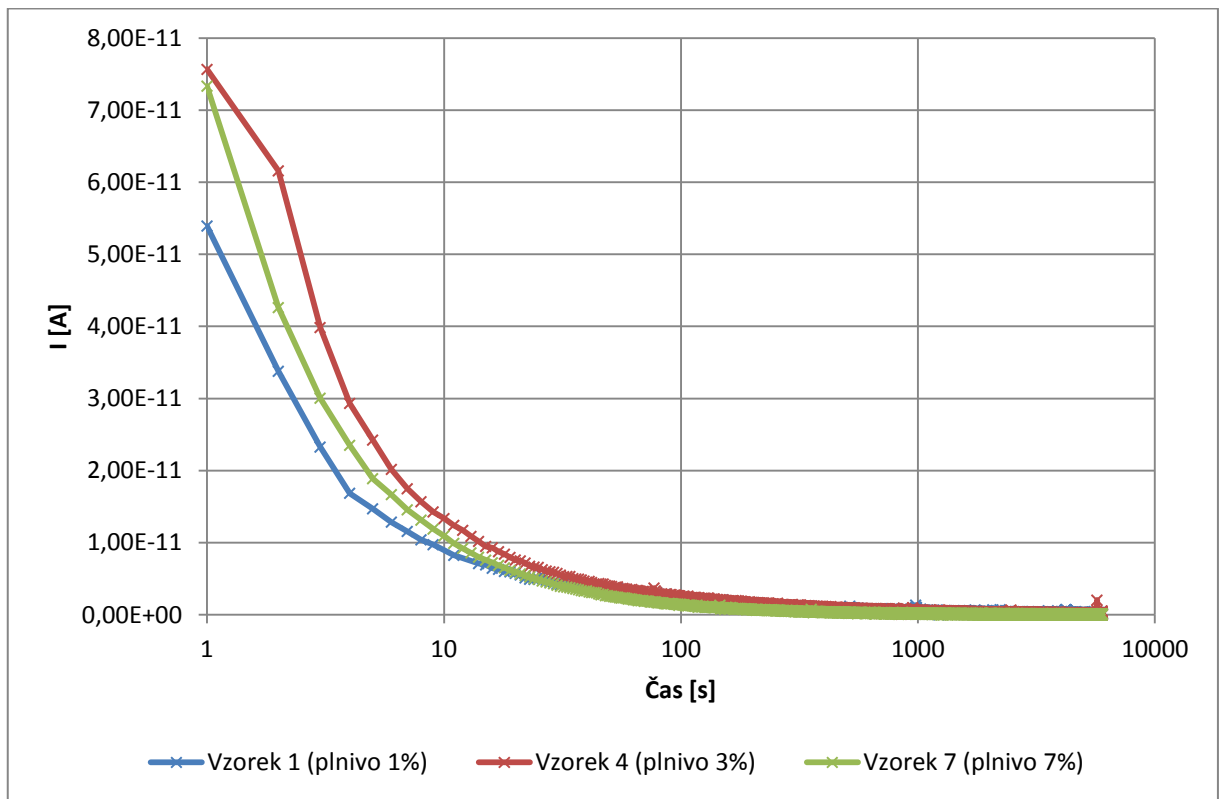
Obr. 2.7: Závislost matric při 1% obsahu plniva na velikost absorpčního proudu



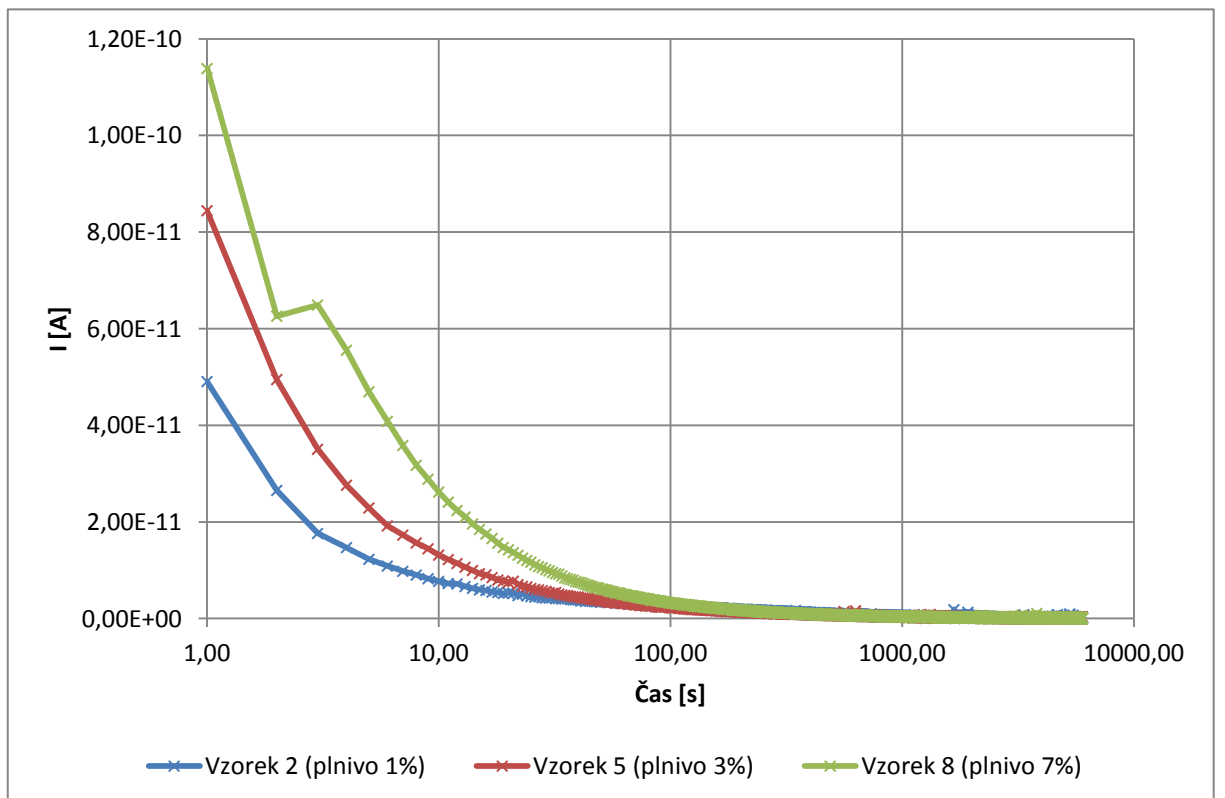
Obr. 2.8: Závislost matric při 3% obsahu plniva na velikost absorpčního proudu



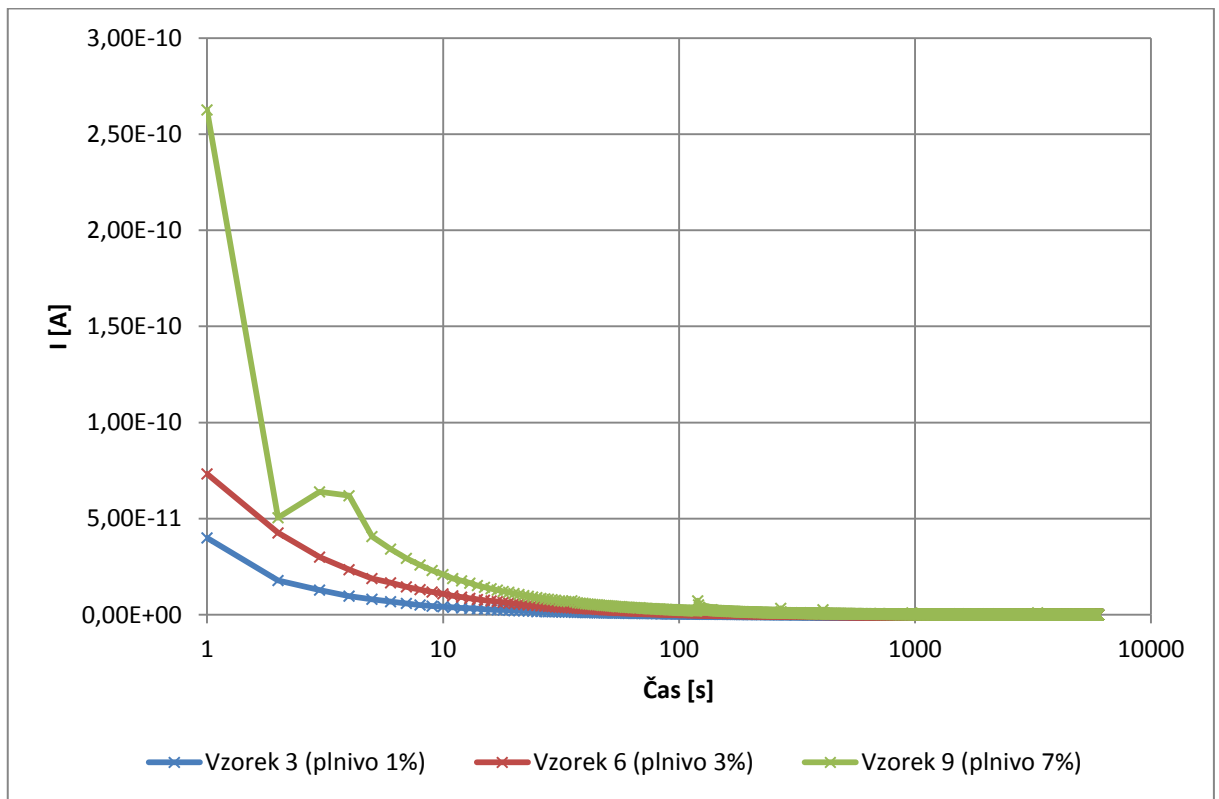
Obr. 2.9: Závislost matric při 7% obsahu plniva na velikost absorpčního proudu



Obr. 2.10: Závislost plniva obsaženého v matrici A na velikost absorpčního proudu



Obr. 2.11: Závislost plniva obsaženého v matrici B na velikost absorpčního proudu



Obr. 2.12: Závislost plniva obsaženého v matrici C na velikost absorpčního proudu

2.3.4 Polarizační indexy

Příklad výpočtu minutového polarizačního indexu:

$$p_{i1} = \frac{i_{15} + i_{6000}}{i_{60} + i_{6000}} = \frac{6,94 \cdot 10^{-12} + 1,55 \cdot 10^{-13}}{2,87 \cdot 10^{-12} + 1,55 \cdot 10^{-13}} = 2,35$$

Příklad výpočtu desetiminutového polarizačního indexu:

$$p_{i1} = \frac{i_{60} + i_{6000}}{i_{600} + i_{6000}} = \frac{2,87 \cdot 10^{-12} + 1,55 \cdot 10^{-13}}{8,57 \cdot 10^{-12} + 1,55 \cdot 10^{-13}} = 2,99$$

V uvedených tabulkách (Tab. 2-4) jsou veškeré vypočtené polarizační indexy.

Tab. 2: Vypočtené polarizační indexy pro matrice s 1% obsahu plniva

Číslo vzorku	Čas [s]	I [A]	p_{i1} [-]	p_{i10} [-]
1	15	6,94E-12	2,35	2,99
	60	2,87E-12		
	600	8,57E-13		
	6000	1,55E-13		
2	15	5,96E-12	1,75	3,43
	60	3,36E-12		
	600	9,07E-13		
	6000	9,99E-14		
3	15	2,97E-12	3,22	3,33
	60	8,54E-13		
	600	1,87E-13		
	6000	9,91E-14		

Tab. 3: Vypočtené polarizační indexy pro matrice s 3% obsahu plniva

Číslo vzorku	Čas [s]	I [A]	p_{i1} [-]	p_{i10} [-]
4	15	9,50E-12	2,69	4,04
	60	3,38E-12		
	600	6,67E-13		
	6000	2,27E-13		
5	15	9,31E-12	2,73	5,23
	60	3,31E-12		
	600	5,07E-13		
	6000	1,56E-13		
6	15	7,60E-12	3,4	6,88
	60	2,20E-12		
	600	2,76E-13		
	6000	5,04E-14		

Tab. 4: Vypočtené polarizační indexy pro matrice s 7% obsahu plniva

Číslo vzorku	Čas [s]	I [A]	p_{i1} [-]	p_{i10} [-]
7	15	1,24E-11	3,47	9,12
	60	3,54E-12		
	600	3,62E-13		
	6000	3,01E-14		
8	15	1,85E-11	3,42	6,77
	60	5,33E-12		
	600	7,06E-13		
	6000	9,54E-14		
9	15	1,44E-11	3,51	7,43
	60	4,02E-12		
	600	4,50E-13		
	6000	1,05E-13		

Z uvedených tabulek (Tab. 2-4) je patrné, že s vyšším obsahem plniva se polarizační indexy zvětšují. V jediné tabulce (Tab. 3) je viditelná závislost matic na polarizační indexy, kde matrice A dosahuje nejnižších hodnot p_i a matrice B nejvyšších hodnot p_i . Nejnižší p_{i1} byl vypočten pro vzorek 2 (1,75) a nejvyšší p_{i1} by vypočten pro vzorek 7 (3,47). Velikost p_{i1} pro dobré izolační materiály se pohybuje v rozmezí (3-7), proto materiál vzorku 2 není vhodný pro elektroizolační aplikace.

2.3.5 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita byla vypočtena z absorpčních proudů. U vypočtených hodnot (Tab. 5) je patrné, že rozdíly matic a obsah plniva neovlivnil výslednou rezistivitu. Nejnižší vypočtenou vnitřní rezistivitu má vzorek 4. Nejvyšší vypočtenou vnitřní rezistivitu dosáhl materiál vzorku 7, který je nejvhodnější pro elektroizolační aplikace.

Tab. 5: Vypočtené hodnoty

Číslo vzorku	h [m]	I [A]	R_x [Ω]	ρ_v [$\Omega \cdot m$]
1	2,80E-04	1,55E-13	3,22E+15	2,62E+16
2	2,62E-04	9,99E-14	5,01E+15	4,34E+16
3	3,01E-04	9,91E-14	5,05E+15	3,81E+16
4	2,73E-04	2,27E-13	2,20E+15	1,83E+16
5	2,60E-04	1,56E-13	3,21E+15	2,80E+16
6	3,01E-04	5,04E-14	9,92E+15	7,48E+16
7	2,79E-04	3,01E-14	1,66E+16	1,35E+17
8	2,57E-04	9,54E-14	5,24E+15	4,63E+16
9	2,96E-04	1,05E-13	4,78E+15	3,67E+16

Příklad výpočtu vnitřní rezistivity:

Na obrázku (Obr. 2.13) je vidět elektrodový systém. Níže jsou uvedeny parametry důležité pro výpočet vnitřní a povrchové rezistivity.

$$d_1 = 50,8 \text{ mm}$$

$$g = 3 \text{ mm}$$

Výpočet efektivní plochy měrné elektrody:

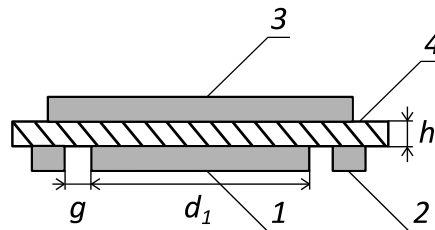
$$A = \frac{\pi(d_1 + g)^2}{4} = \frac{\pi(50,8 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3})}{4} = 2,2733 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Příklad výpočtu R_x pro vzorek 1:

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{500}{1,55 \cdot 10^{-13}} = 3,22 \cdot 10^{15} \Omega$$

Příklad výpočtu vnitřní resistivity pro vzorek 1:

$$\rho_v = R_x \cdot \frac{A}{h} = 3,22 \cdot 10^{15} \cdot \frac{2,2733 \cdot 10^{-3}}{2,8 \cdot 10^{-4}} \Omega \cdot \text{m}$$



Obr. 2.13: Elektrodotový systém pro měření pro měření vnitřní a povrchové resistivity, 1 - měrná elektroda, 2 - ochranná elektroda, 3 - ochranná elektroda, 4 - vzorek [1]

2.3.6 Povrchová rezistivita

Měření povrchové rezistivity se nepovedlo, protože se pravděpodobně jedná o příliš dobré izolační materiály. Naměřené hodnoty nebyly použitelné pro výpočet povrchové rezistivity.

Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo porovnání vlastností měřených vzorků. Jednotlivé vzorky byly tvořeny z rozdílných matic polyetylenů a obsahovaly rozdílné množství plniva. Předpokladem bylo rozdílné chování, které se v měření projevilo. Měřené vzorky měly přesné rozměry stanovené jako parametr.

Při vyhodnocení teplotní závislosti vzorků, kde parametr je frekvence, dosáhla nejlepších hodnot ve dvou ze tří měření matrice C, trend zlepšení hodnot se s rostoucím plnivem vždy neprojevil. Nejlepším materiálem byl u dvou ze tří měření vzorek 9 s největším počtem plniva (7%) s maticí C.

Při vyhodnocení frekvenční závislosti vzorků, kde parametr je teplota (20 °C), dosáhla ve všech případech nejlepších hodnot matrice C, trend zlepšení hodnot se s rostoucím plnivem vždy neprojevil. Nejlepším materiálem byl u dvou ze tří měření vzorek 9 s největším počtem plniva (7%).

Ze souboru materiálů byl vybrán náhodný vzorek, který byl vyhodnocen v souvislosti s proměnnou teplotou a frekvencí. Projevil se trend zlepšení hodnoty relativní permitivity s rostoucí teplotou a frekvencí.

Při vyhodnocení polarizačních indexů se trend zlepšení hodnot se s rostoucím plnivem projevil. Vnitřní rezistivita je vypočítána ze shodných hodnot absorpčních proudů, a proto nejlepší hodnota vzorku 7 vyšla pro oba výpočty.

Jak už bylo řečeno, povrchová rezistivita se nepovedla naměřit, protože se pravděpodobně jednalo o velmi dobré elektroizolační materiály.

Seznam literatury a informačních zdrojů

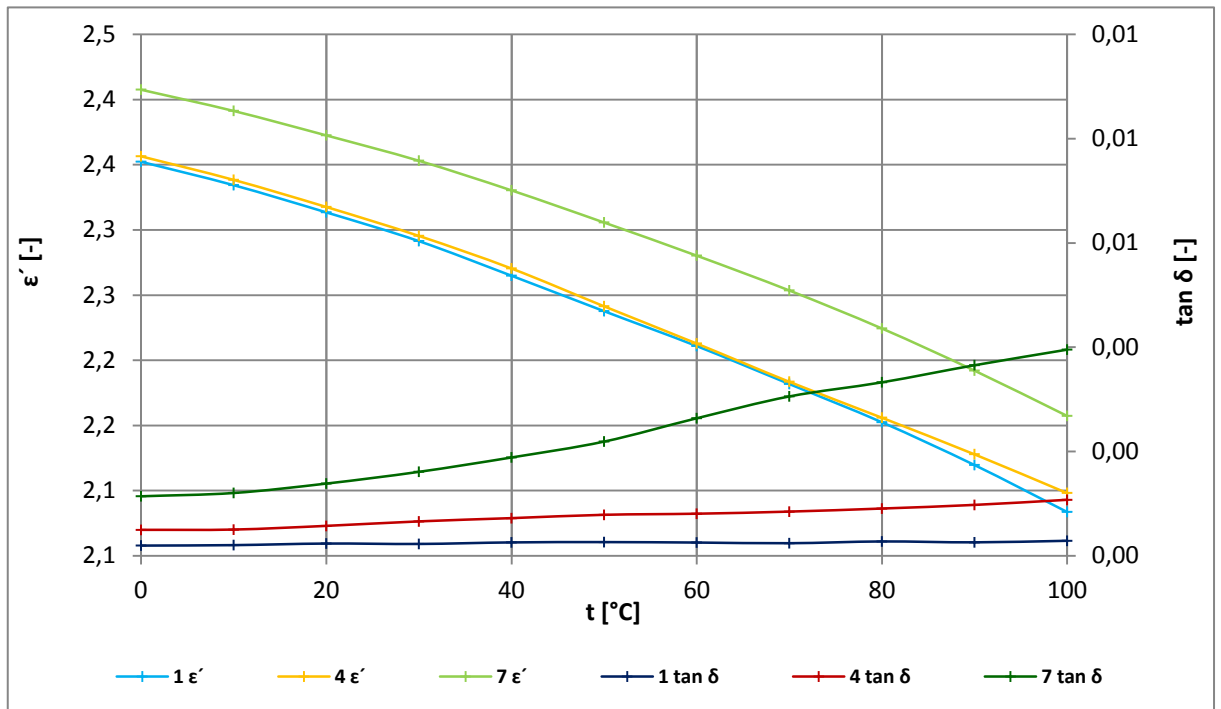
- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] MENTLÍK, V. A KOL. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [4] HASSDENTEUFEL, J. A KOL. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967. 680 s.
- [5] HASSDENTEUFEL, J. A KOL. *Elektrotechnické materiály*. 2. vyd. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1978. 607 s.
- [6] MOLHANEC, Martin. *Dielektrické vlastnosti tuhých látek* [online]. Praha [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf
- [7] JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M.: *Materiály a technická dokumentace, Část materiály v elektrotechnice*. Skriptum VUT Brno, 2003
- [8] Volume and Surface Resistivity Measurements of Insulating Materials Using the Model 6517A Electrometer/High Resistance Meter. [online]. 2001, č. 314, s. 4 [cit. 2014-06-07]. Dostupné z: www.keithley.com/data?asset=6069

Seznam obrázků

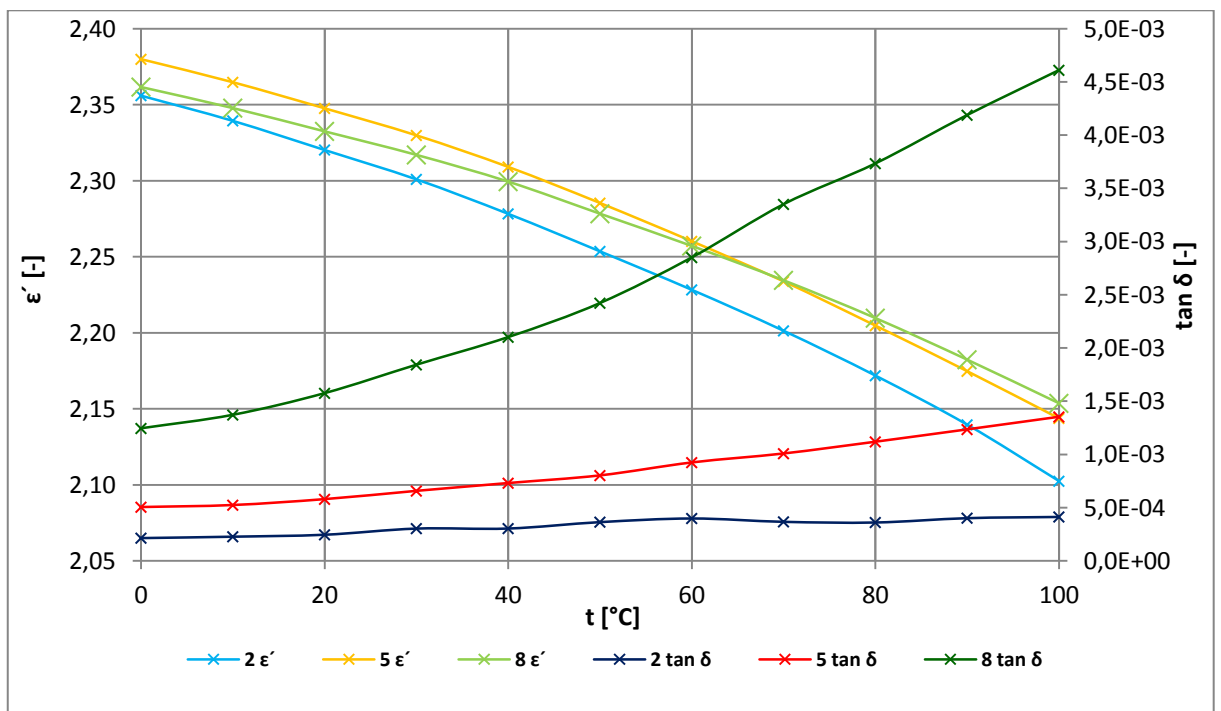
OBR. 1.1: NEPOLÁRNÍ DIELEKTRIKUM	11
OBR. 1.2: POLÁRNÍ DIELEKTRIKU	12
OBR. 1.3: FREKVENČNÍ ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY POLÁRNÍHO A NEPOLÁRNÍHO DIELEKTRIKA PRO DVĚ TEPLOTY	13
OBR. 1.4: TEPLOTNÍ ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY A ZTRÁTOVÉHO ČÍSLA POLÁRNÍHO A NEPOLÁRNÍHO DIELEKTRIKA PŘI DVOU KMITOČTECH.....	13
OBR. 1.5: GRAFICKÁ INTERPRETACE KOMPLEXNÍ PERMITIVITY, KDE $E \vec{m}$ A $D \vec{m}$ JSOU AMPLITUDY PŘÍSLUŠNÝCH VEKTORŮ [1].....	17
OBR. 1.6: FÁZOROVÝ DIAGRAM REÁLNÉHO DIELEKTRIKA	24
OBR. 1.7 PARALELNÍ NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ DIELEKTRIKA	25
OBR. 1.8: FÁZOROVÝ GIAGRAM PRO PARALELNÍ ZAPOJENÍ.....	25
OBR. 1.9: SÉRIOVÉ NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ DIELEKTRIKA	26
OBR. 1.10: FÁZOROVÝ DIAGRAM PRO SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ.....	26
OBR. 1.11: ČASOVÝ PRŮBĚH KONDENZÁTORU (A) NABÍJENÍ (B) VYBÍJENÍ.....	27
OBR. 1.12: ČASOVÝ PRŮBĚH PROUDU V DANÉM DIELEKTRIKU PŘI POČÍTKU PŮSOBENÍ STEJNOSMĚRNÉHO POLE A PO UKONČENÍ PŮSOBENÍ	28
OBR. 1.13: ZAPOJENÍ ELEKTROD PRO MĚŘENÍ VNITŘNÍ REZISTIVITY VOLTAMPÉROVOU METODOU [8]	30
OBR. 2.1: FREKVENČNÍ ANALYZÁTOR ALPHA-A	34
OBR. 2.2: ČÁSTI KRYOSYSTÉMU	34
OBR. 2.3: TEPLOTNÍ ZÁVISLOST NA REÁLNOU SLOŽKY PERMITIVITY VŠECH MĚŘENÝCH VZORKŮ	37
OBR. 2.4: TEPLOTNÍ ZÁVISLOST NA ZTRÁTOVÝ ČINITEL VŠECH MĚŘENÝCH VZORKŮ	37
OBR. 2.5: TEPLOTNÍ ZÁVISLOST NA KAPACITY VŠECH MĚŘENÝCH VZORKŮ.....	38
OBR. 2.6: MĚŘÍCÍ PRACOVNÍSTĚ PRO MĚŘENÍ ABSORPČNÍCH PROUDŮ	39
OBR. 2.7: ZÁVISLOST MATRIC PŘI 1% OBSAHU PLNIVA NA VELIKOST ABSORPČNÍHO PROUDU.....	40
OBR. 2.8: ZÁVISLOST MATRIC PŘI 3% OBSAHU PLNIVA NA VELIKOST ABSORPČNÍHO PROUDU.....	41
OBR. 2.9: ZÁVISLOST MATRIC PŘI 7% OBSAHU PLNIVA NA VELIKOST ABSORPČNÍHO PROUDU.....	41
OBR. 2.10: ZÁVISLOST PLNIVA OBSAŽENÉHO V MATRICI A NA VELIKOST ABSORPČNÍHO PROUDU.....	42
OBR. 2.11: ZÁVISLOST PLNIVA OBSAŽENÉHO V MATRICI B NA VELIKOST ABSORPČNÍHO PROUDU.....	42
OBR. 2.12: ZÁVISLOST PLNIVA OBSAŽENÉHO V MATRICI C NA VELIKOST ABSORPČNÍHO PROUDU.....	43
OBR. 2.13: ELEKTRODOVÝ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ PRO MĚŘENÍ VNITŘNÍ A POVRCHOVÉ REZISTIVITY, 1 - MĚRNÁ ELEKTRODA, 2 - OCHRANNÁ ELEKTRODA, 3 - OCHRANNÁ ELEKTRODA, 4 – VZOREK [1].....	46

Přílohy

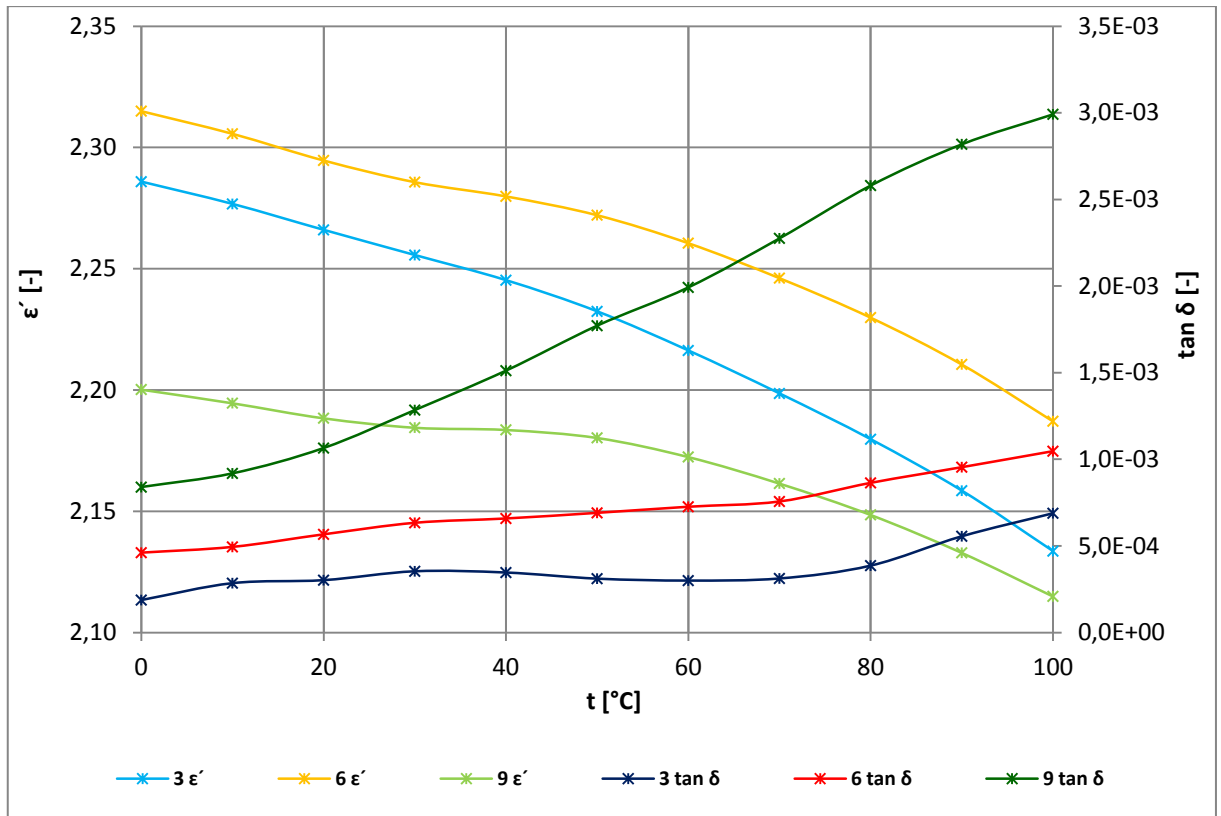
Teplotní závislosti



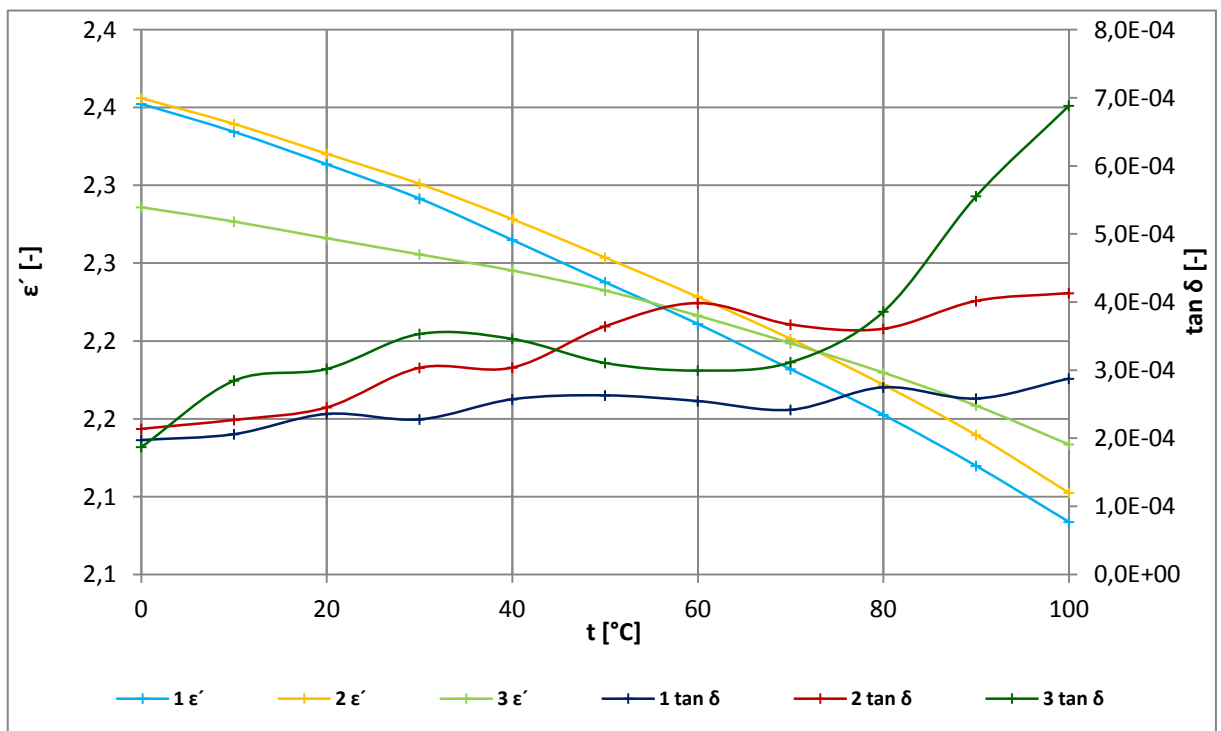
Příloha 1: Teplotní závislost ϵ' a $\tan \delta$ pro vzorky 1, 4, 7 (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici A)



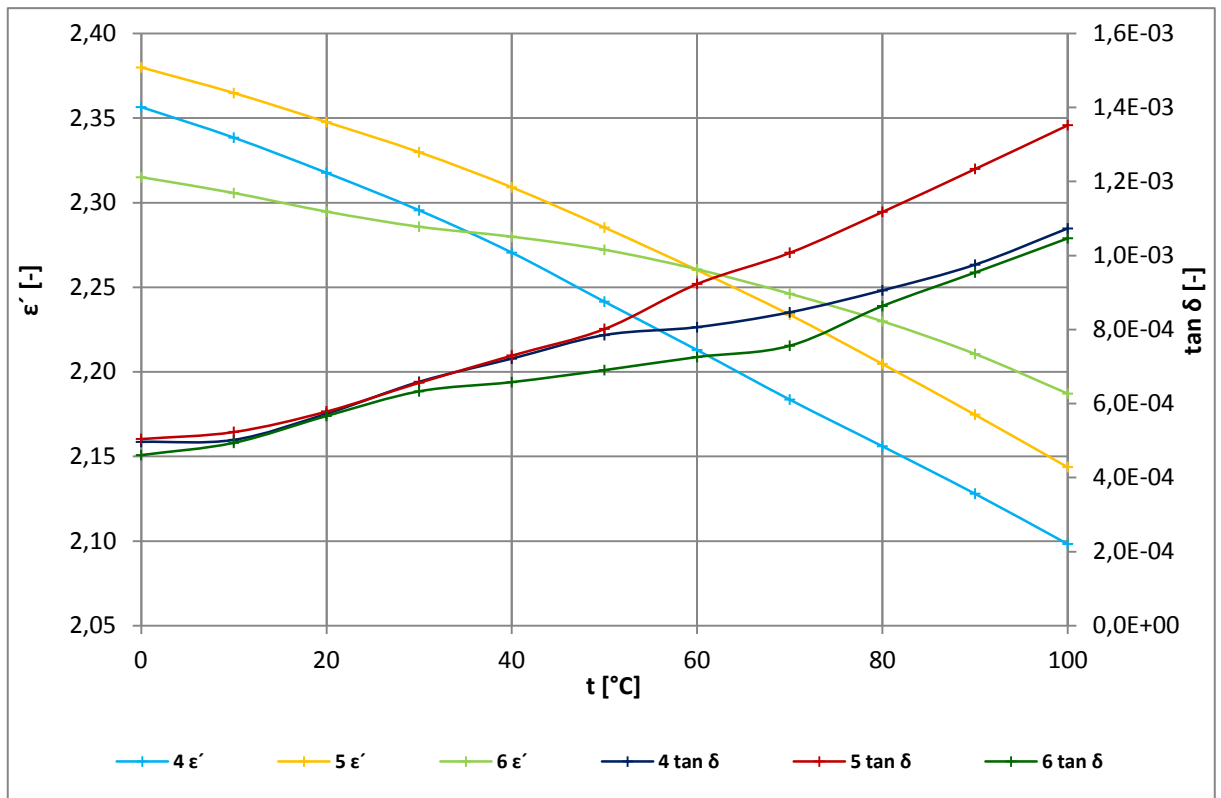
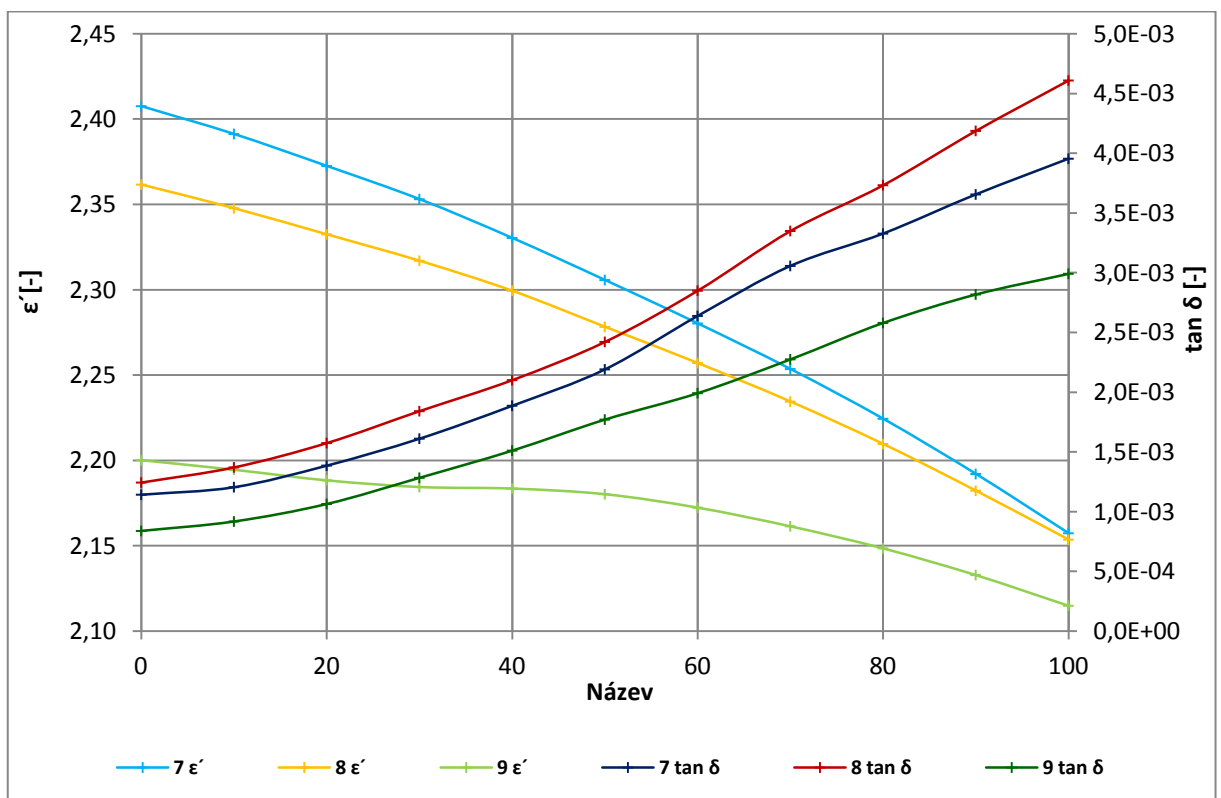
Příloha 2: Teplotní závislost ϵ' a $\tan \delta$ pro vzorky 2, 5, 8 (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici B)

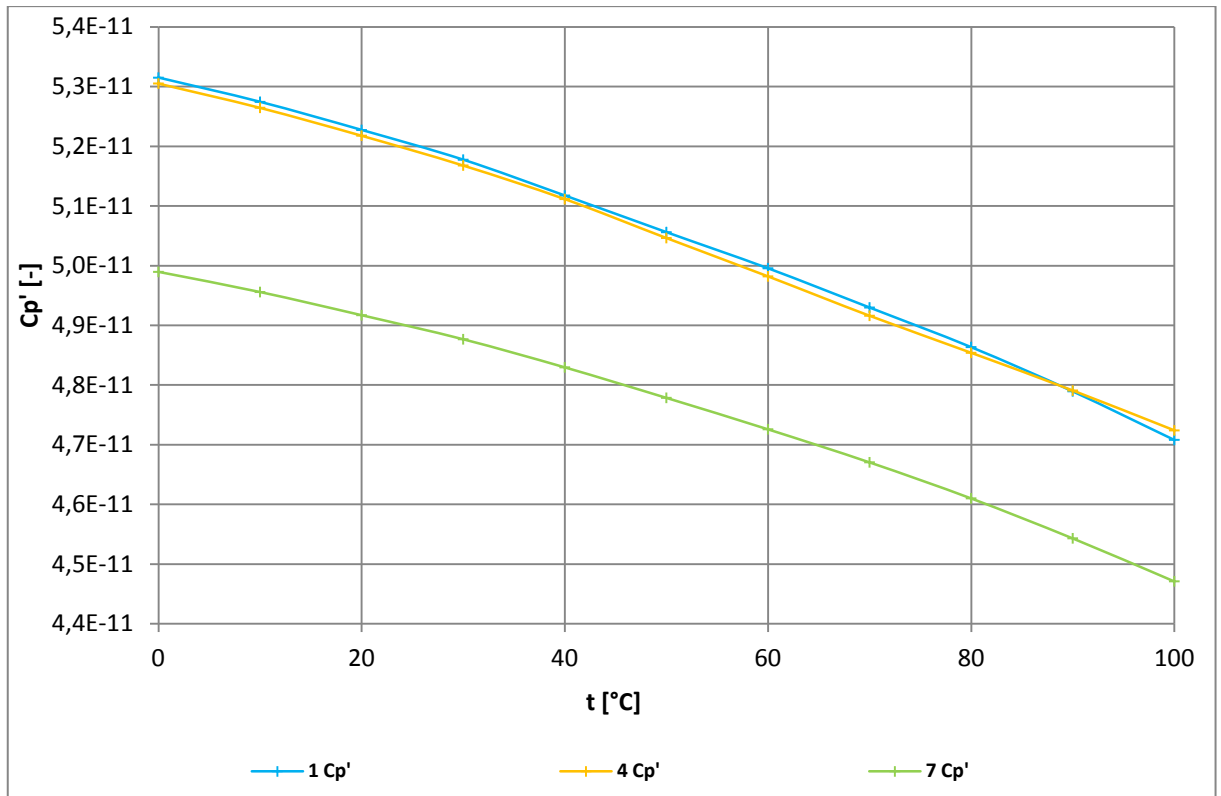


Příloha 3: Teplotní závislost ϵ' a $\tan \delta$ pro vzorky 3, 6, 9 (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici C)

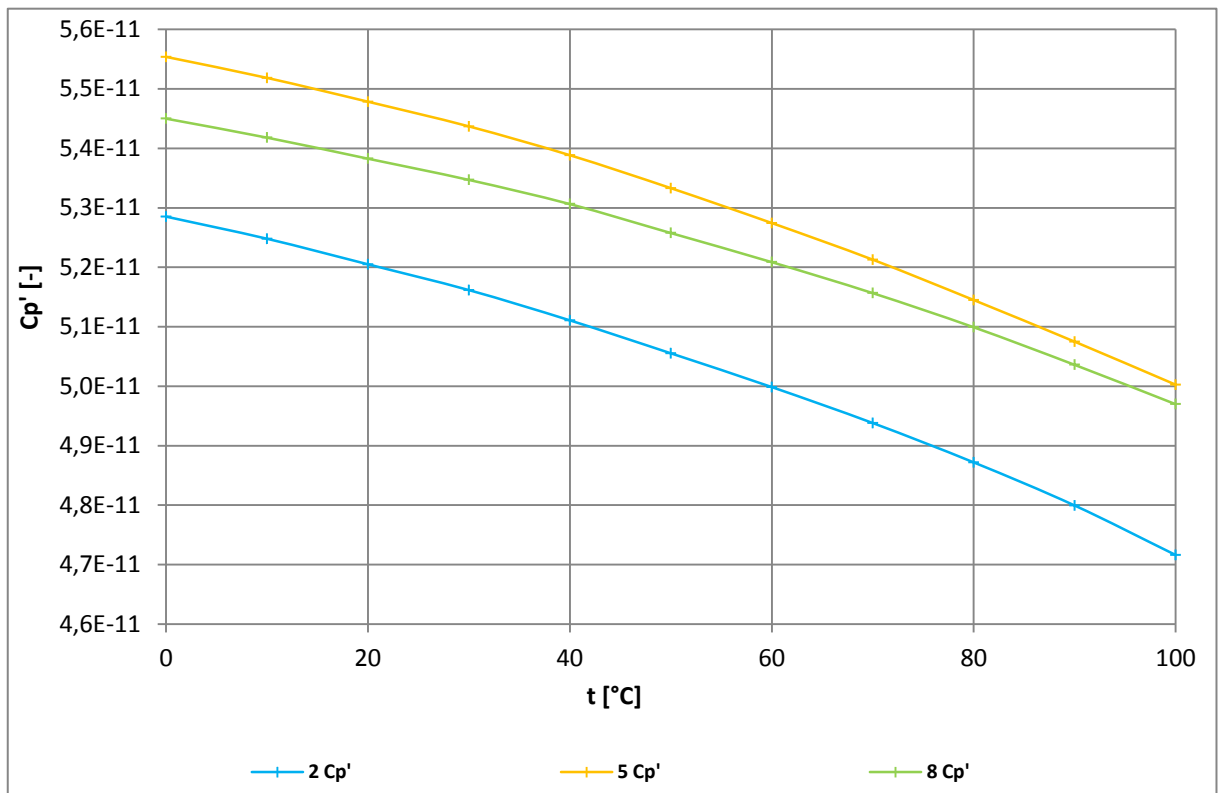


Příloha 4: Teplotní závislost ϵ' a $\tan \delta$ pro vzorky 1, 2, 3 (rozdílné matrice při 1% obsahu plniva)

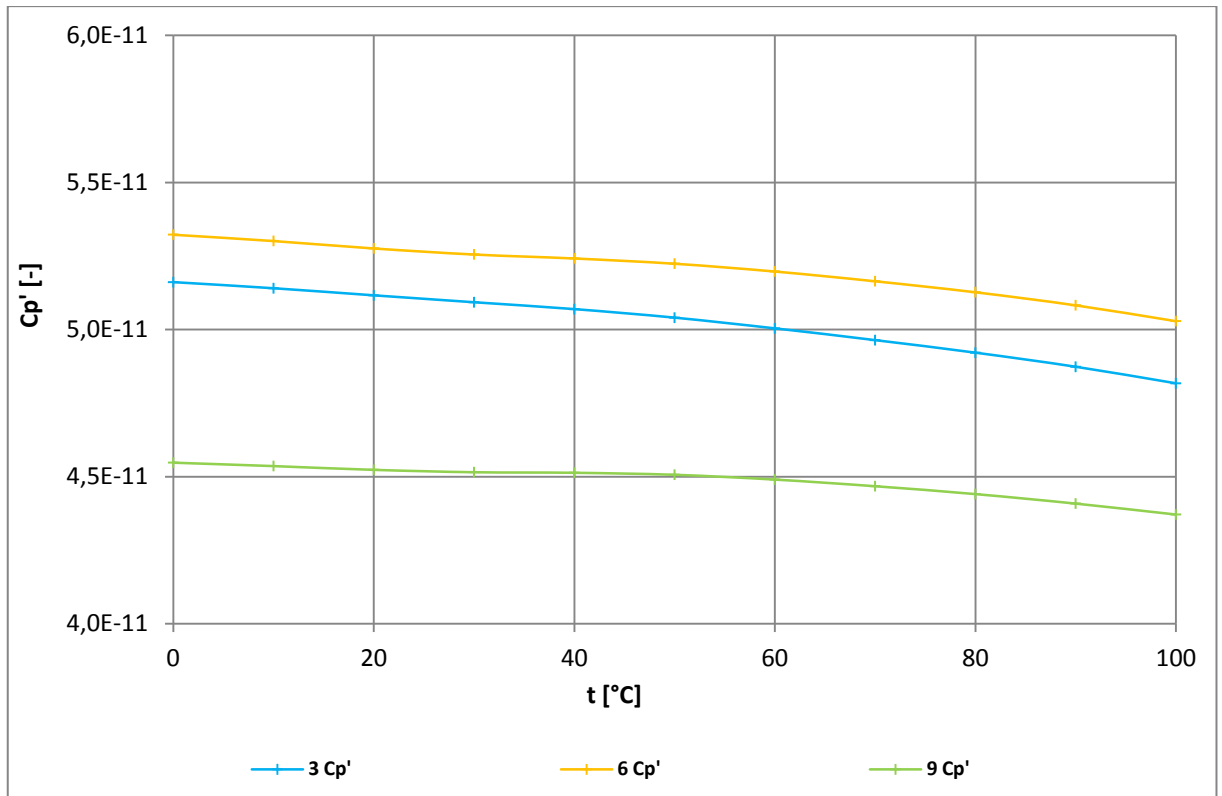
Příloha 5: Teplotní závislost ϵ' a $\tan \delta$ pro vzorky 4, 5, 6 (rozdílné matrice při 3% obsahu plniva)Příloha 6: Teplotní závislost ϵ' a $\tan \delta$ pro vzorky 7, 8, 9 (rozdílné matrice při 7% obsahu plniva)



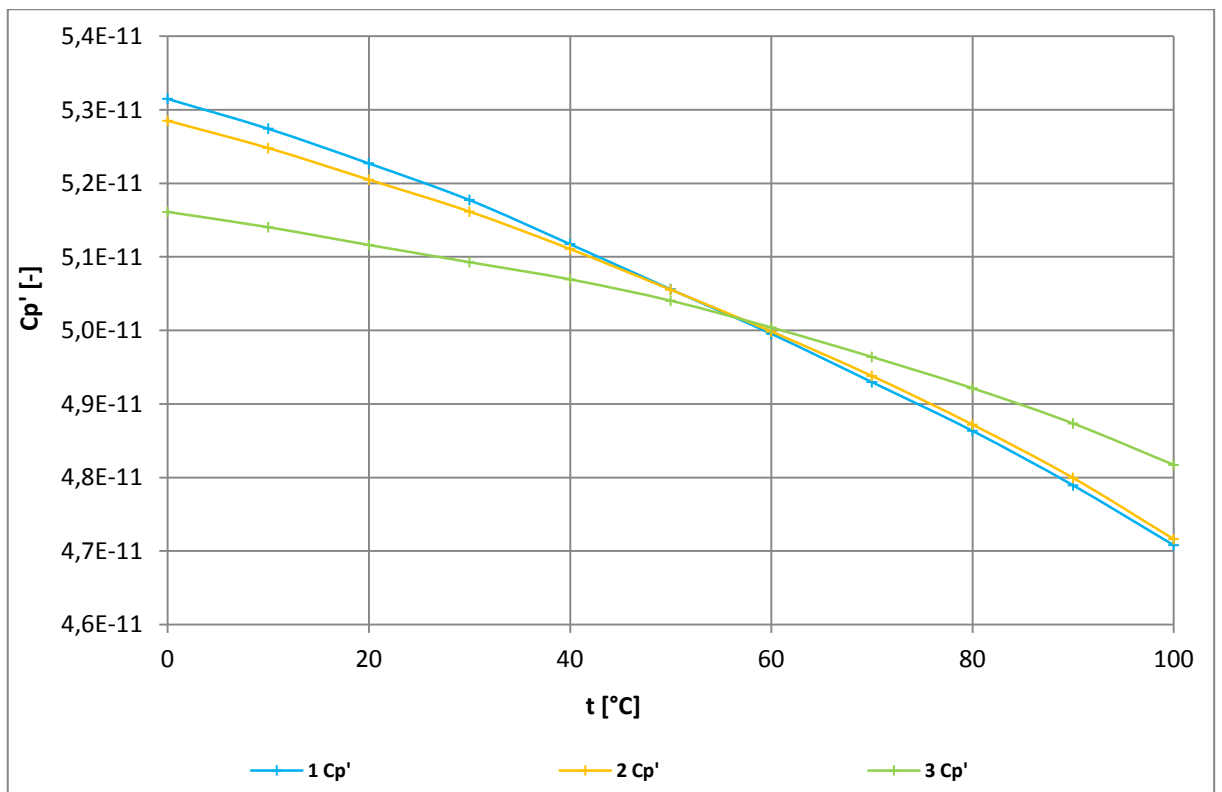
Příloha 7: Teplotní závislost C_p' pro vzorky 1, 4, 7 (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici A)



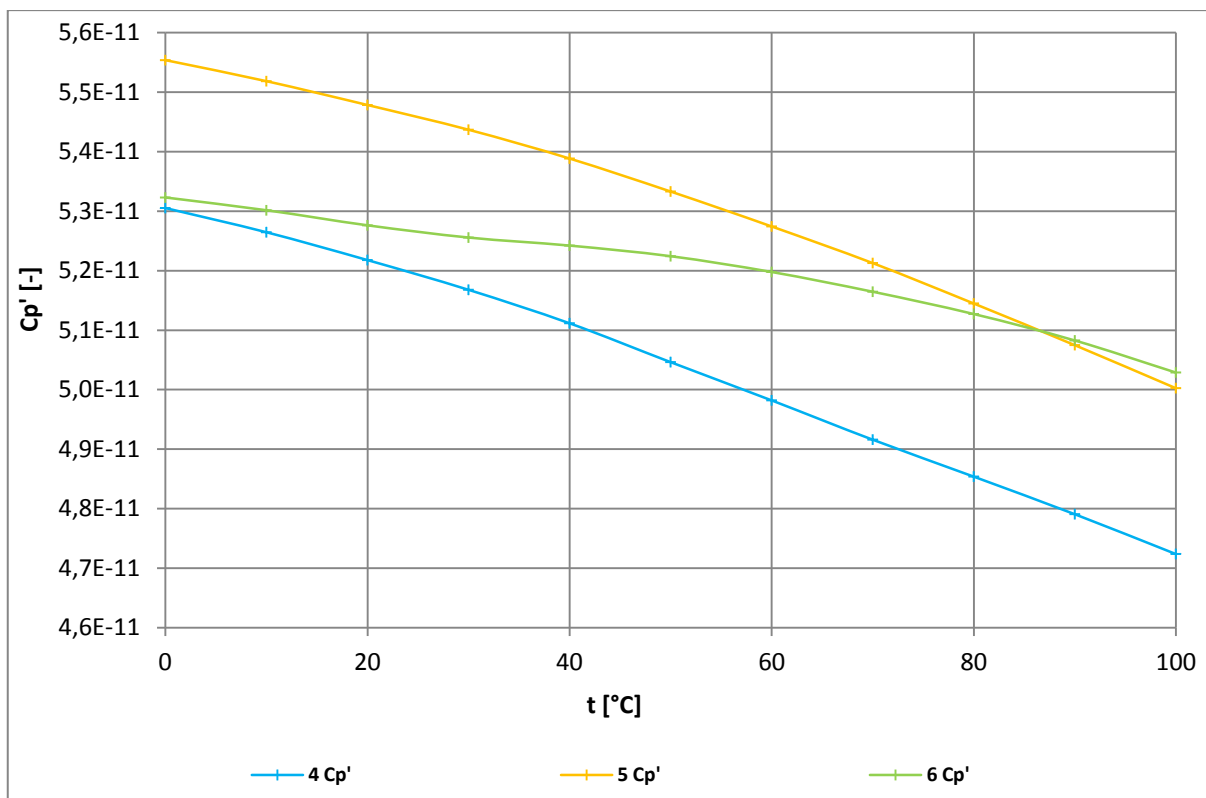
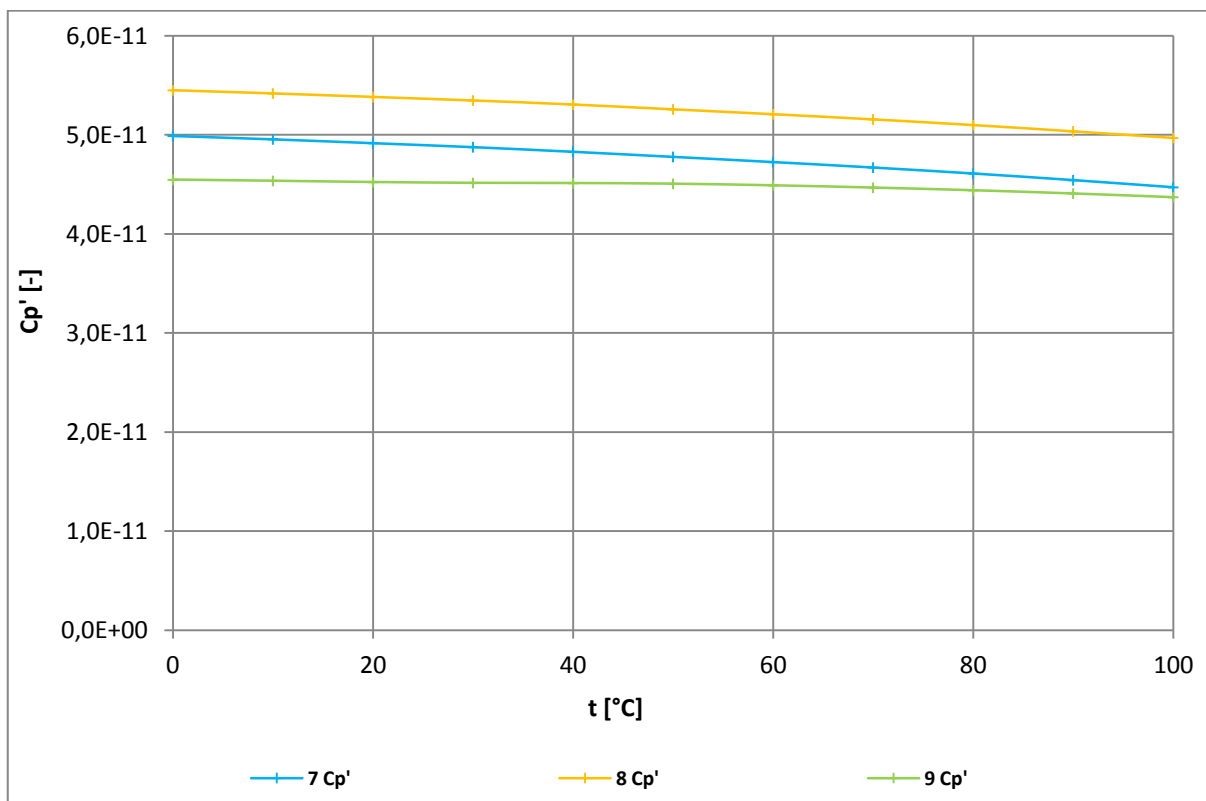
Příloha 8: Teplotní závislost C_p' pro vzorky 2, 5, 8 (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici B)



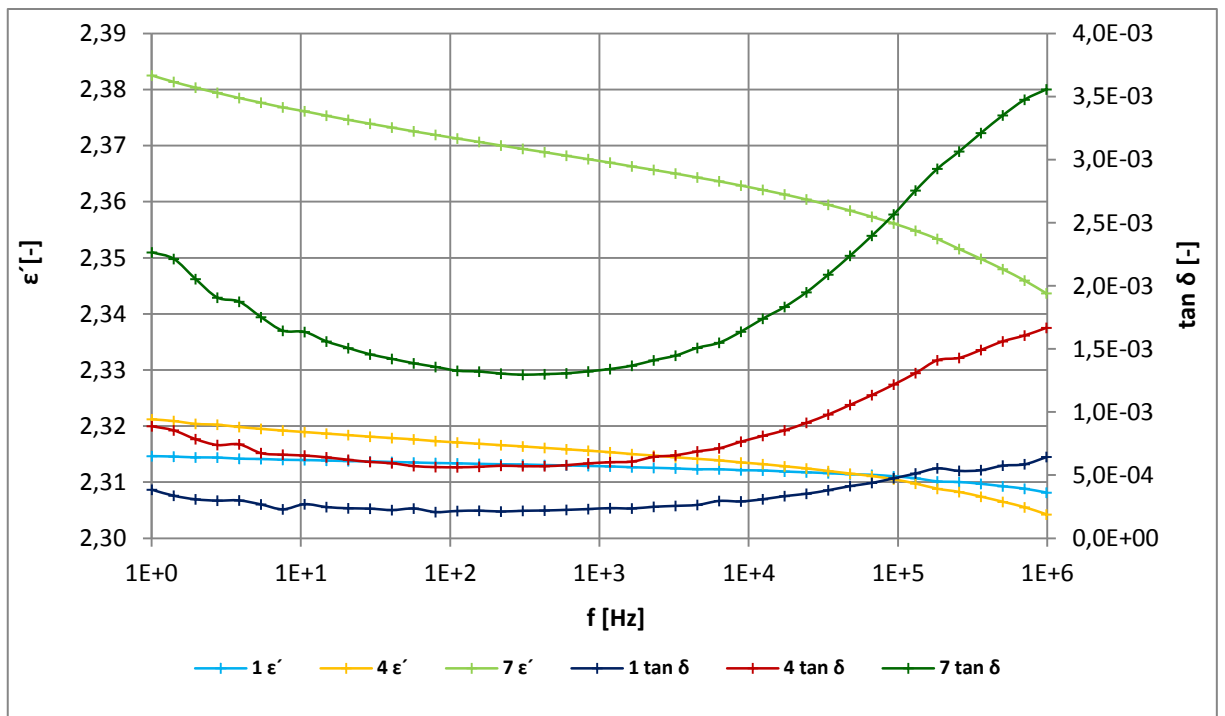
Příloha 9: Teplotní závislost C_p' pro vzorky 3, 6, 9 (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici C)



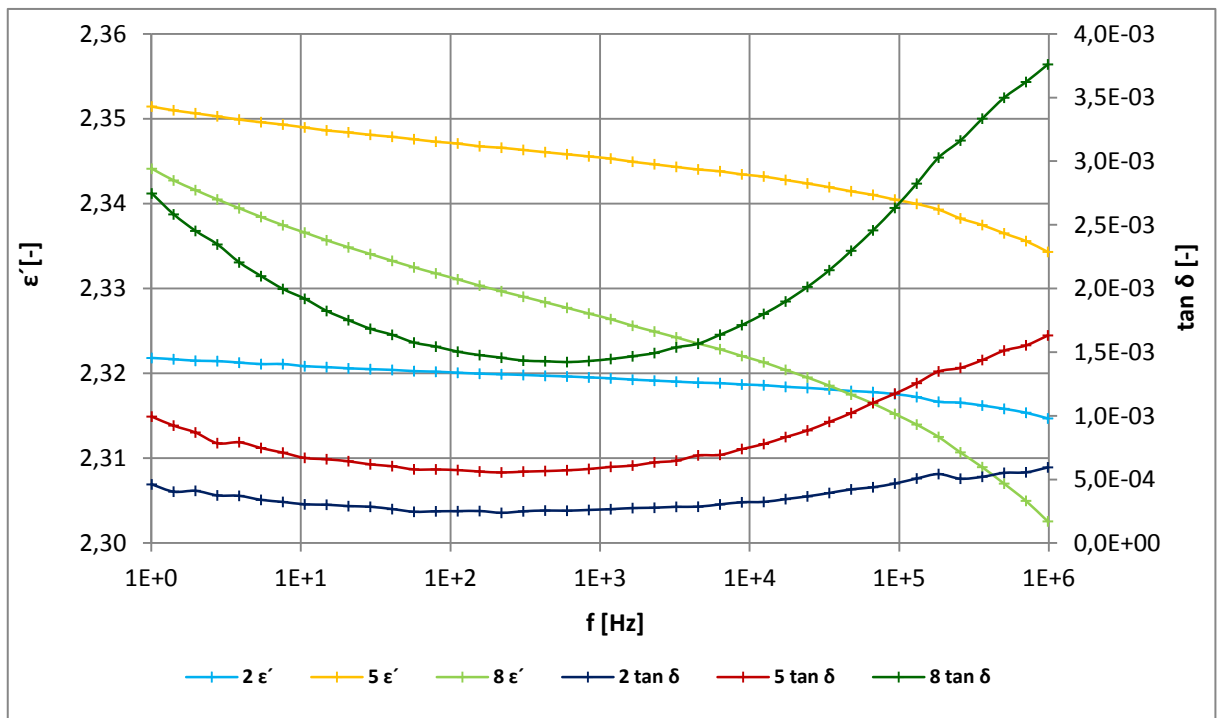
Příloha 10: Teplotní závislost C_p' pro vzorky 1, 2, 3 (rozdílné matrice při 1% obsahu plniva)

Příloha 11: Teplotní závislost C_p' pro vzorky 1, 2, 3 (rozdílné matrice při 3% obsahu plniva)Příloha 12: Teplotní závislost C_p' pro vzorky 1, 2, 3 (rozdílné matrice při 7% obsahu plniva)

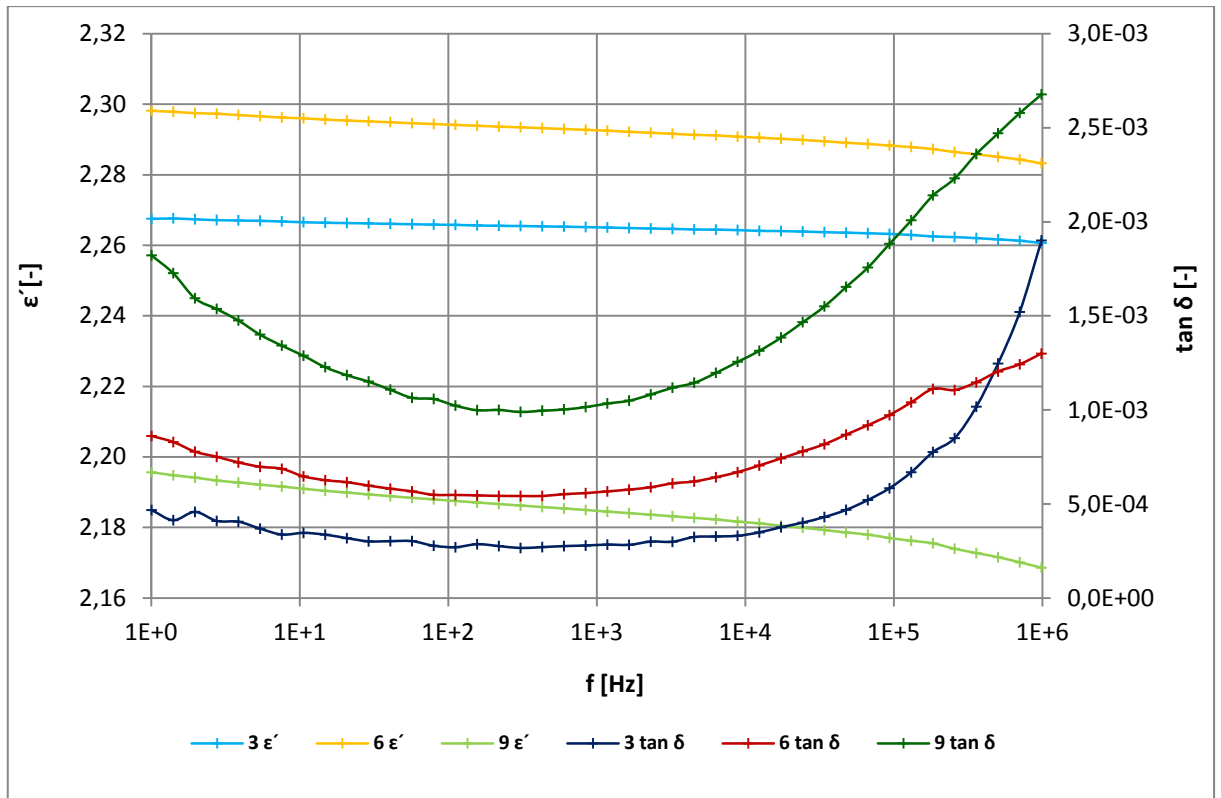
Frekvenční závislosti



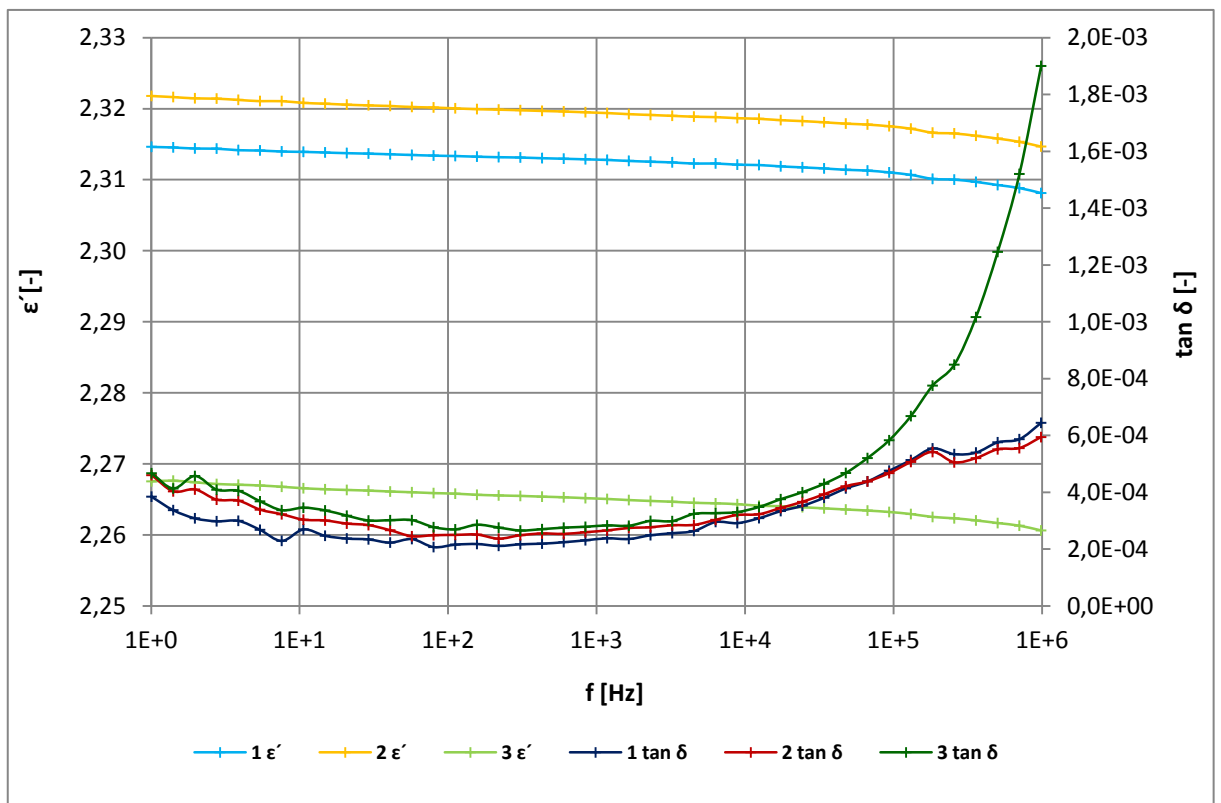
Příloha 13: Frekvenční závislost ϵ' a $\tan \delta$ při 20°C (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici A)



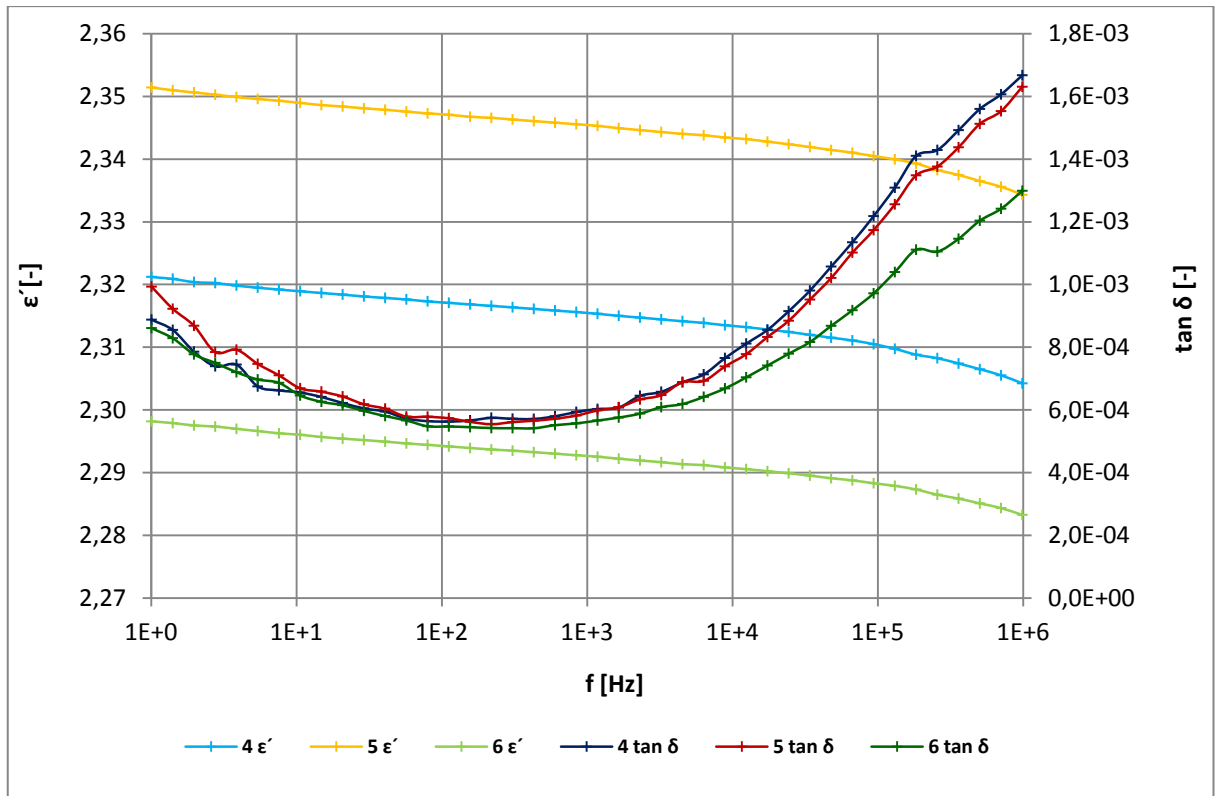
Příloha 14: Frekvenční závislost ϵ' a $\tan \delta$ při 20°C (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici B)



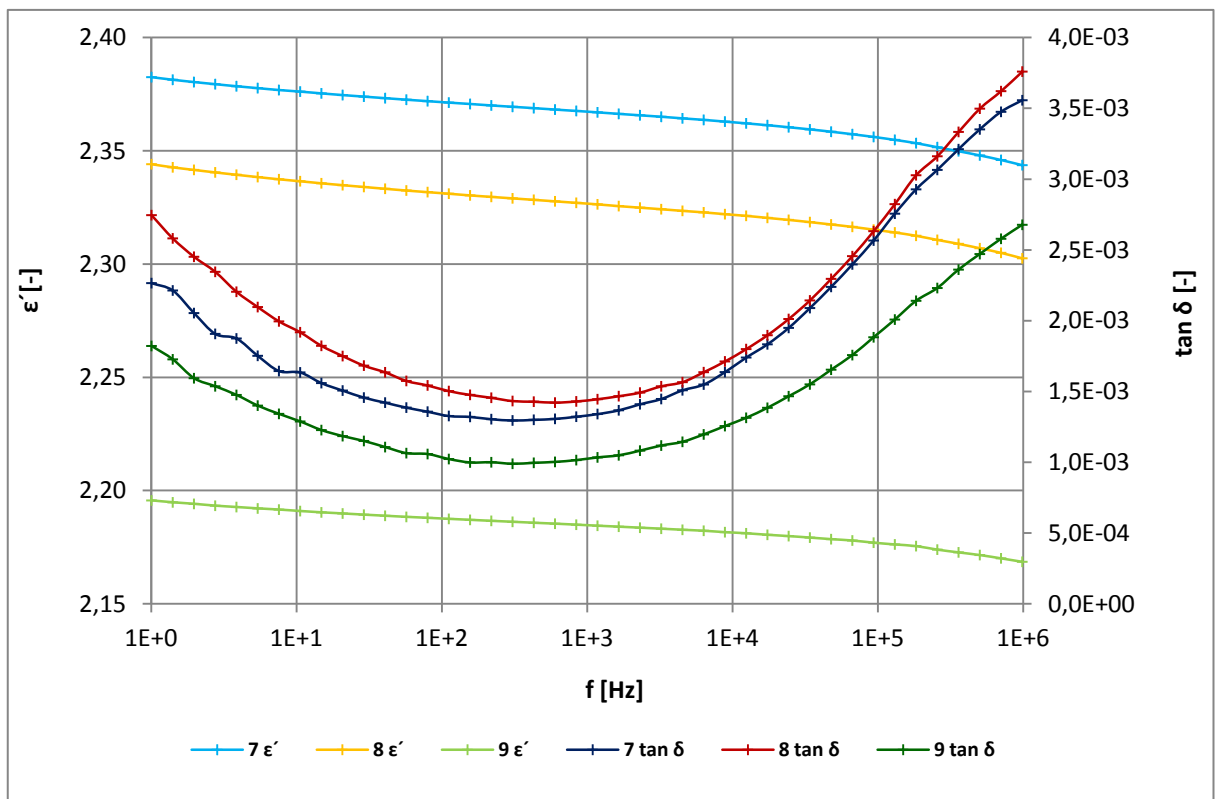
Příloha 15: Frekvenční závislost ϵ' a $\tan \delta$ při 20°C (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici C)



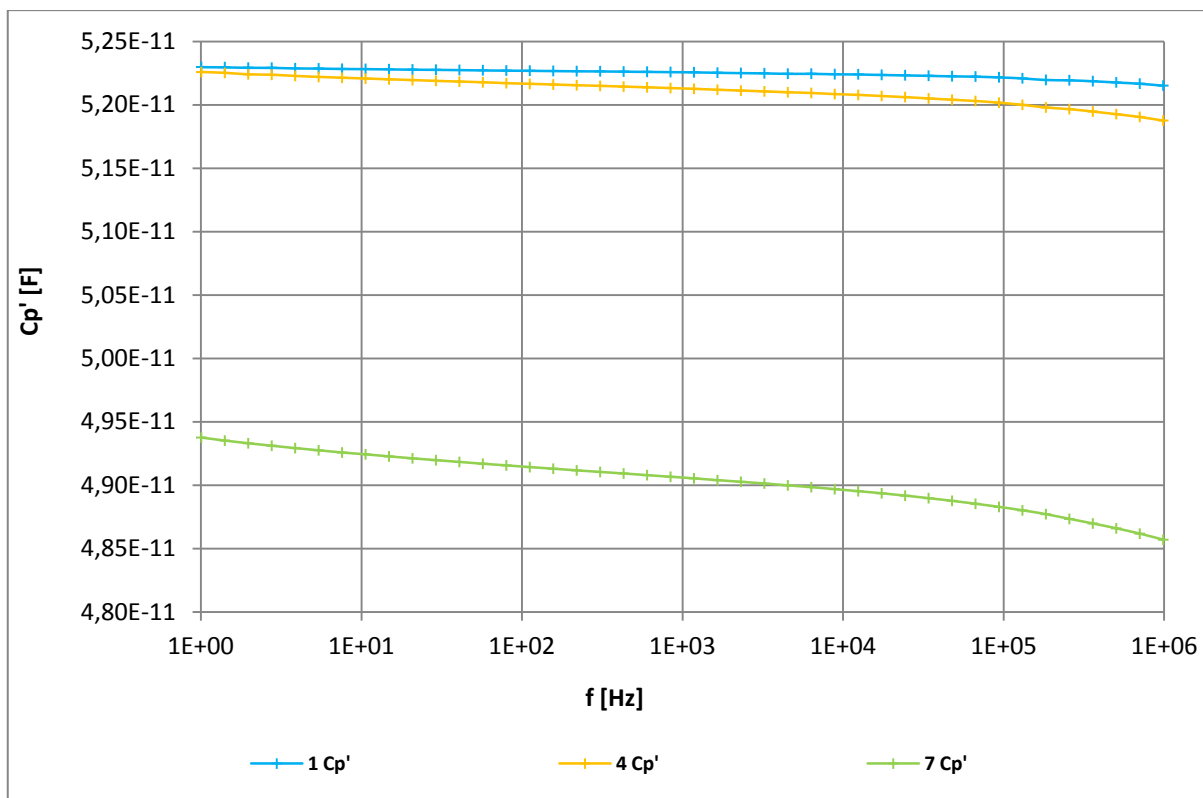
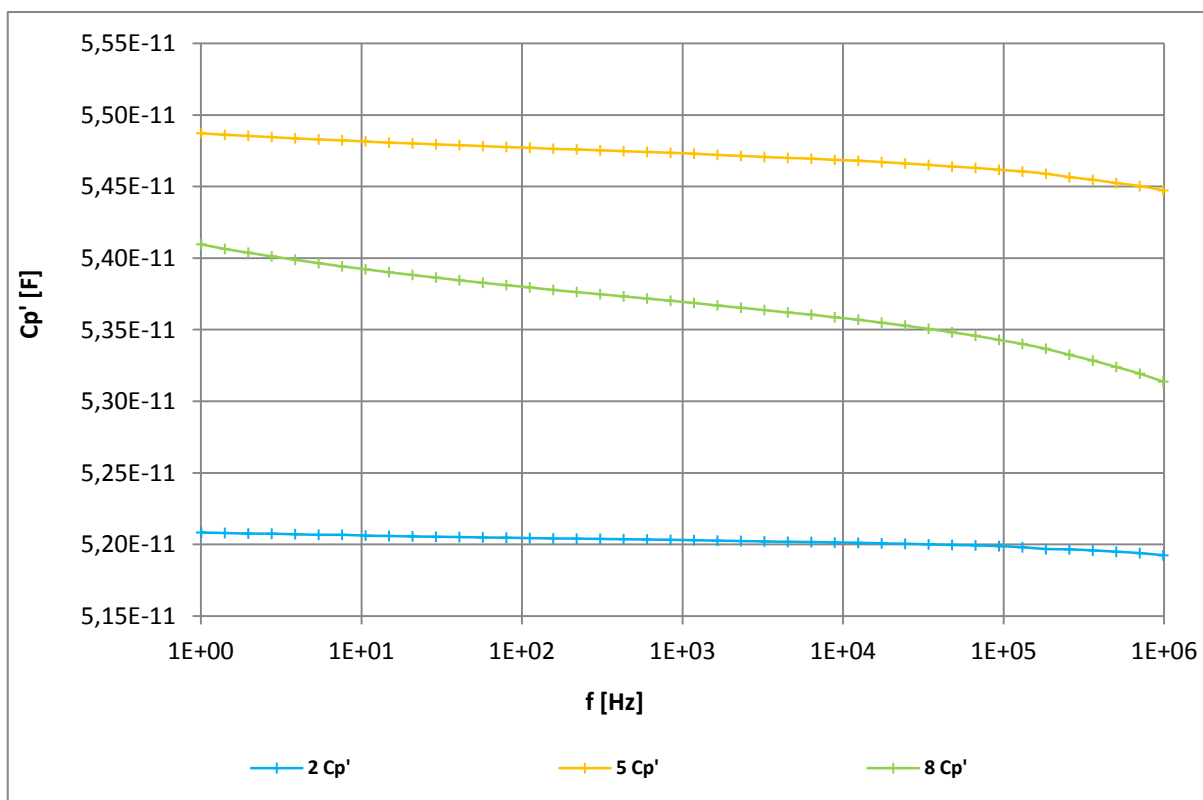
Příloha 16: Frekvenční závislost ϵ' a $\tan \delta$ při 20°C (rozdílné matrice při 1% obsahu plniva)

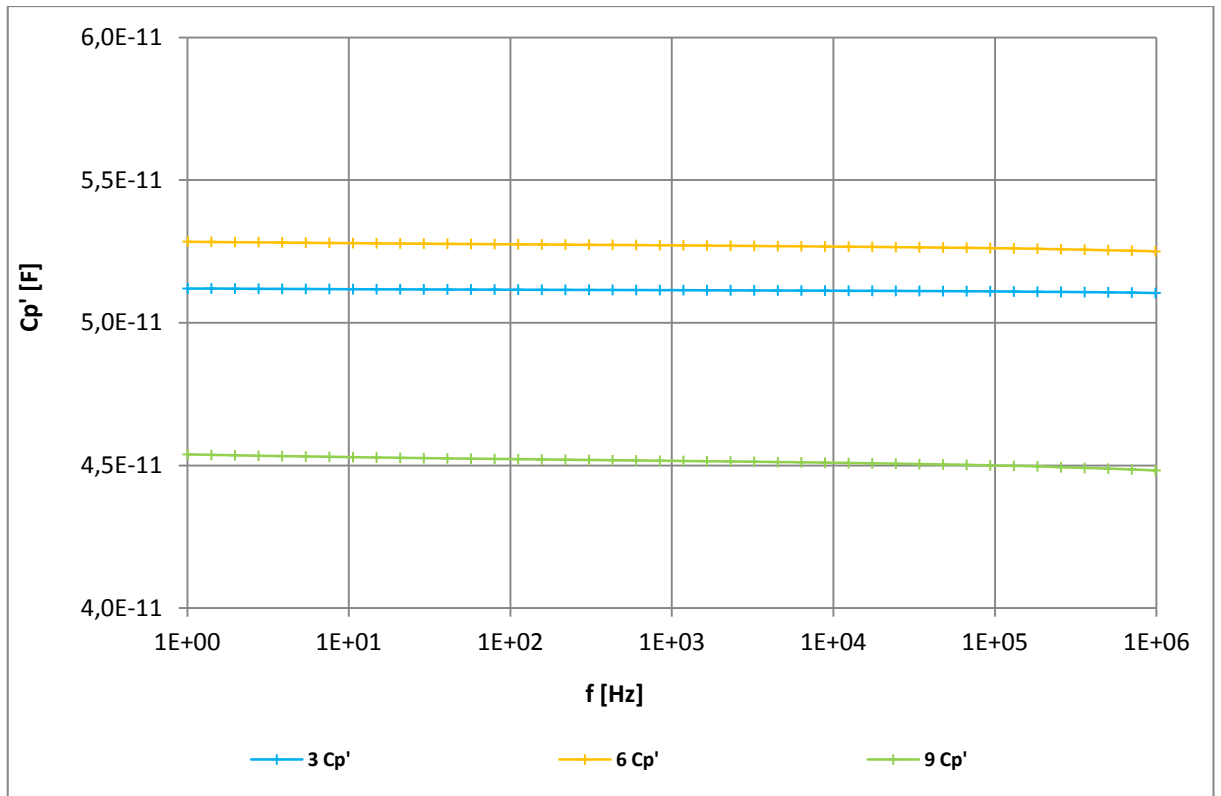


Příloha 17: Frekvenční závislost ϵ' a $\tan \delta$ při 20°C (rozdílné matrice při 3% obsahu plniva)

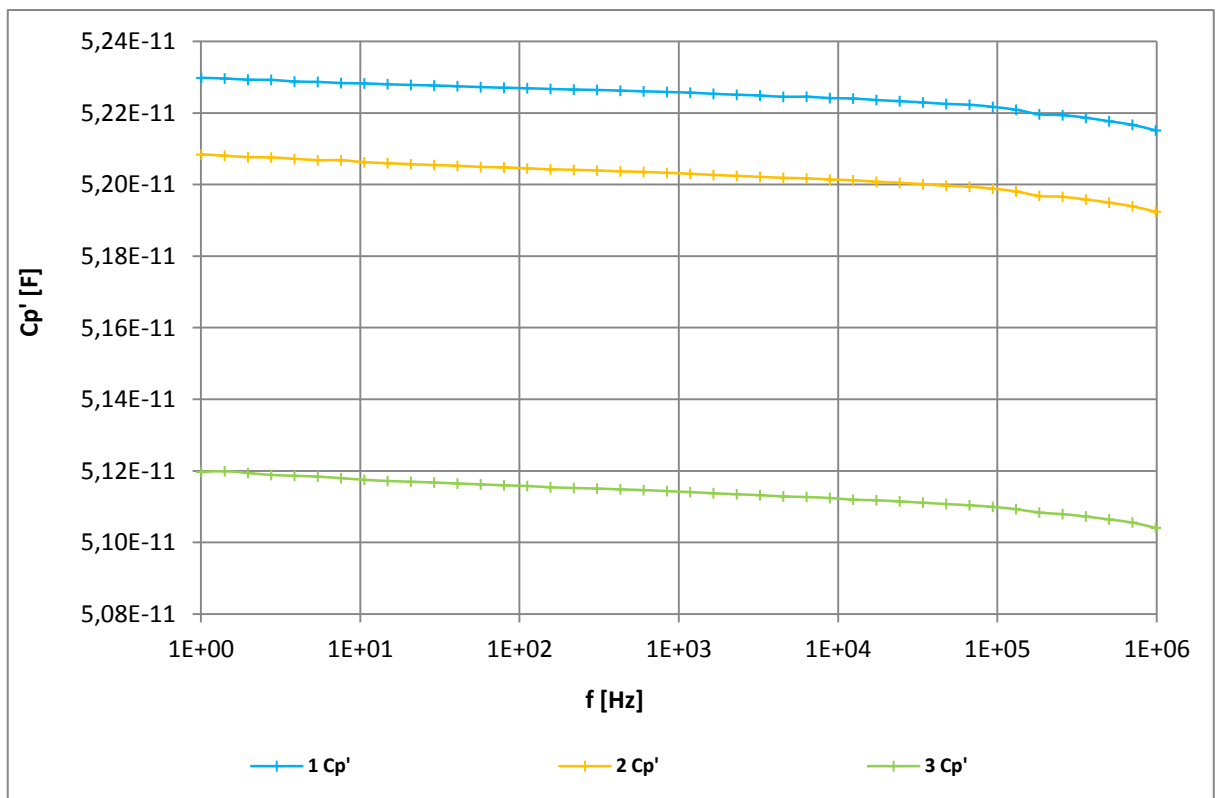


Příloha 18: Frekvenční závislost ϵ' a $\tan \delta$ při 20°C (rozdílné matrice při 7% obsahu plniva)

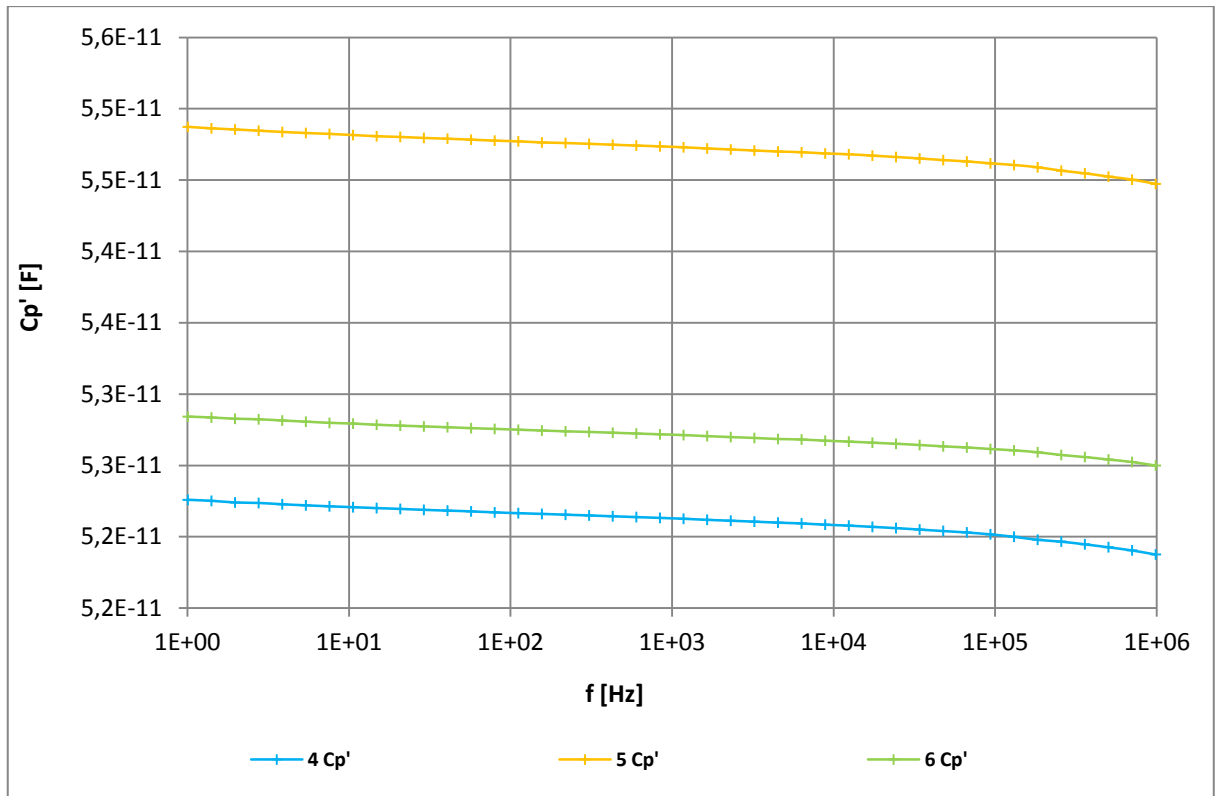
Příloha 19: Frekvenční závislost Cp' při 20°C (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici A)Příloha 20: Frekvenční závislost Cp' při 20°C (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici B)



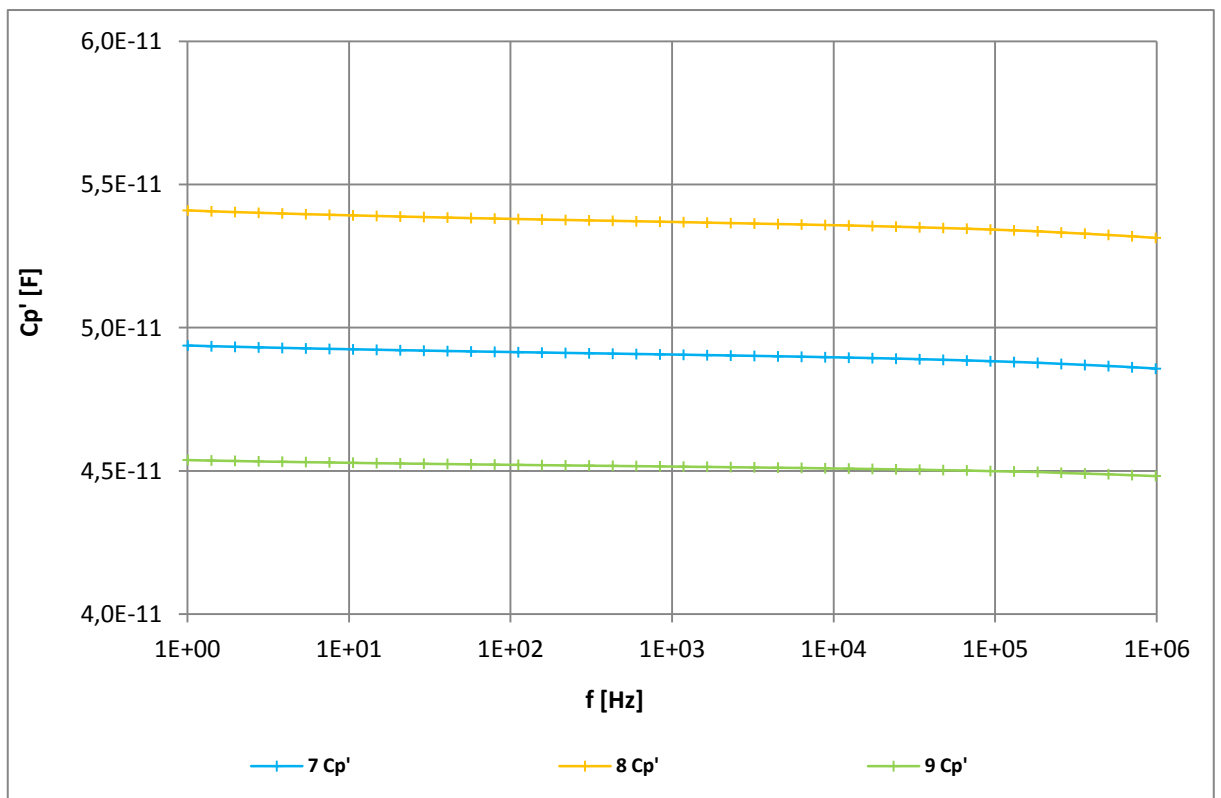
Příloha 21: Frekvenční závislost Cp' při 20°C (rozdílné zastoupení plniva pro Matrici C)



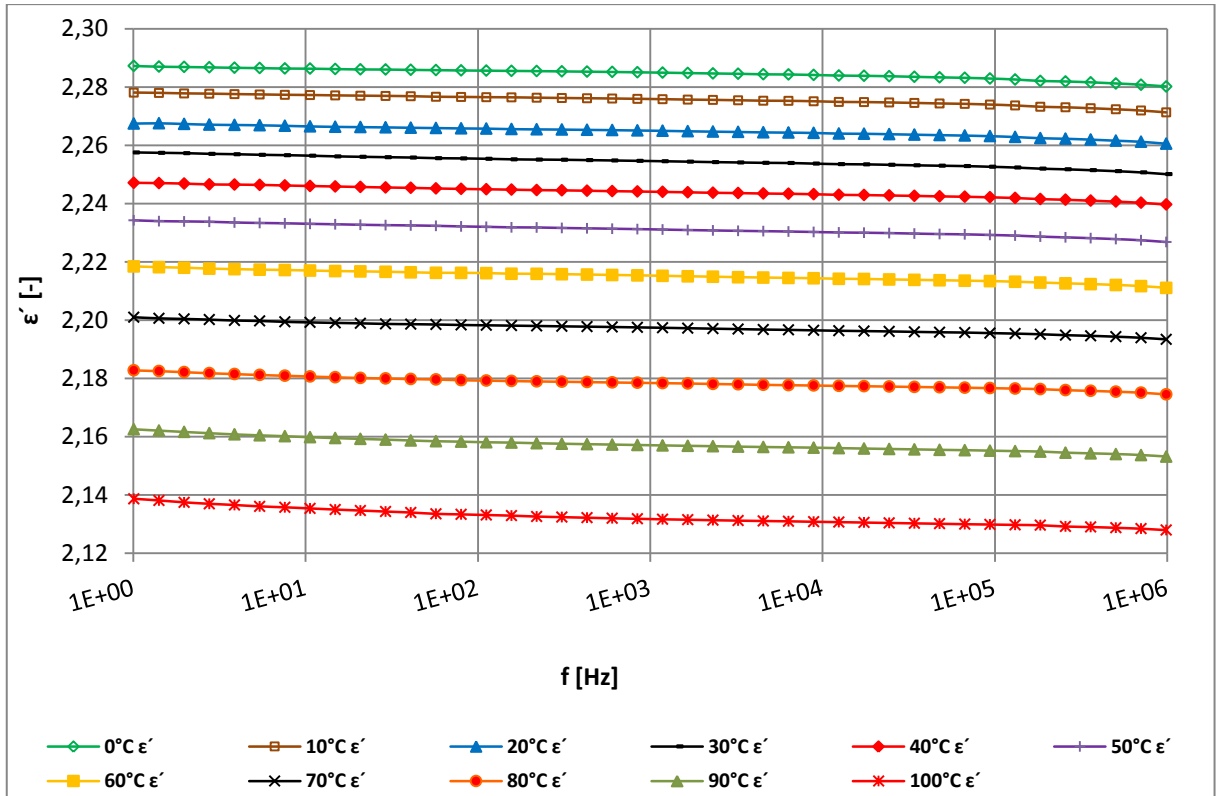
Příloha 22: Frekvenční závislost Cp' při 20°C (rozdílné matrice při 1% obsahu plniva)



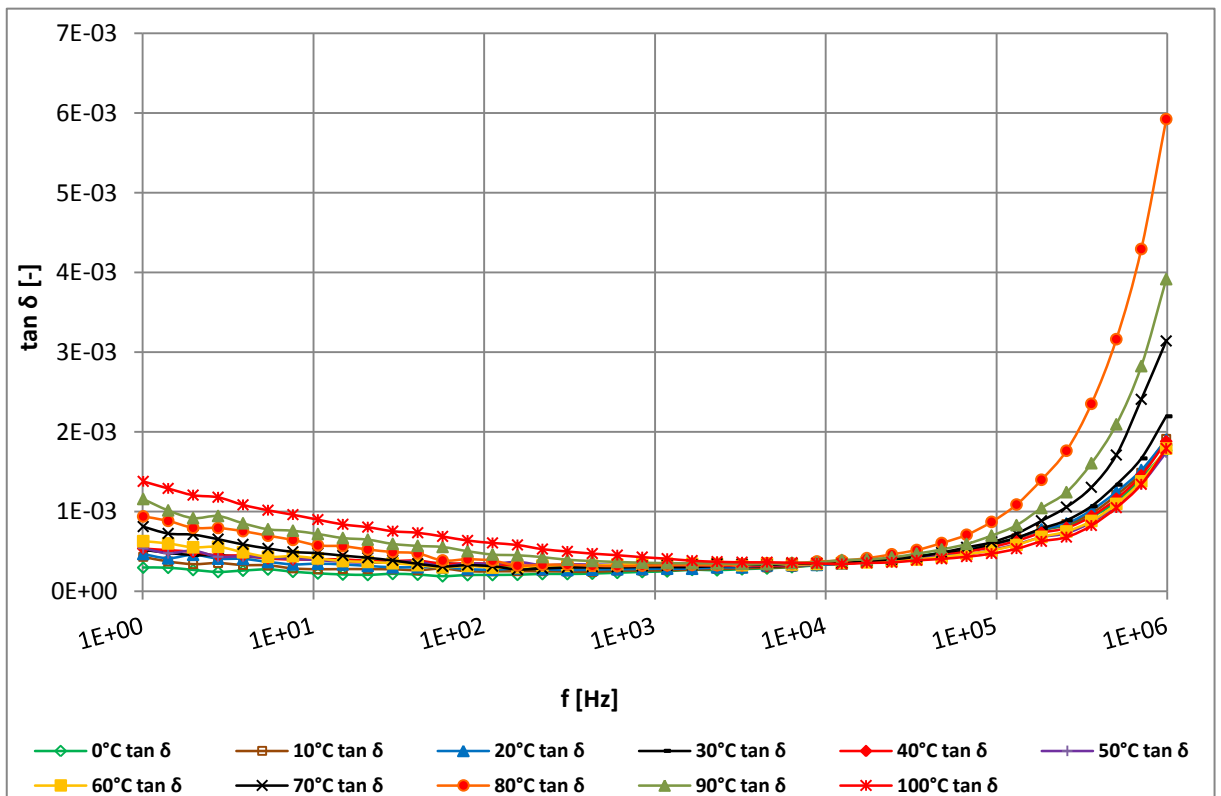
Příloha 23: Frekvenční závislost Cp' při 20°C (rozdílné matrice při 3% obsahu plniva)



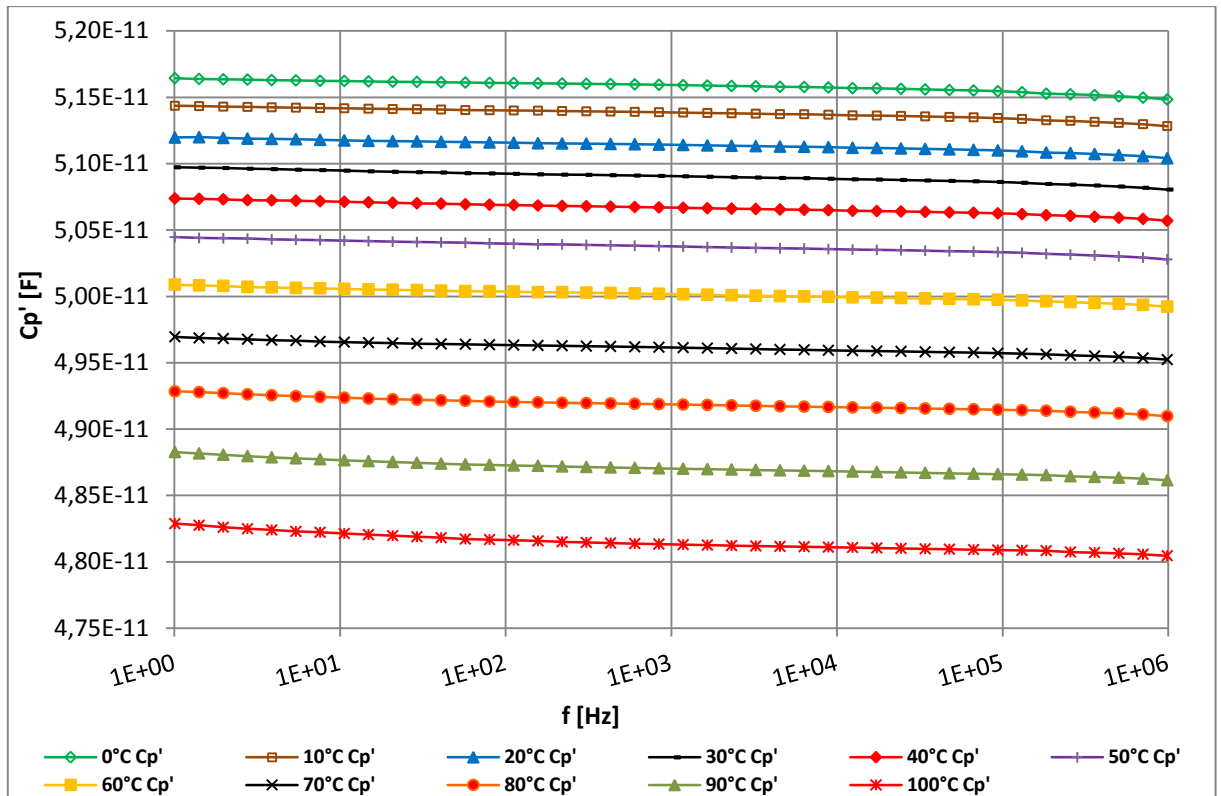
Příloha 24: Frekvenční závislost Cp' při 20°C (rozdílné matrice při 7% obsahu plniva)



Příloha 25: frekvenční závislost ϵ' pro vzorek 3 (matrice C, plnivo 1%)



Příloha 26: frekvenční závislost $\tan \delta$ pro vzorek 3 (matrice C, plnivo 1%)

Příloha 27: frekvenční závislost C_p' pro vzorek 3 (matrice C, plnivo 1%)