

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů s plnivý na
bázi vodivých polymerů**

**vedoucí práce: Ing. Robert Vik, Ph.D.
autor: Bc. Martin Zigler**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ZIGLER**
Osobní číslo: **E10N0065P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů s plnivý na bázi
vodivých polymerů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Zpracujte literární rešerši dané problematiky.
2. Připravte kompozitní materiály s různými typy polymerních plniv.
3. Změřte vybrané elektrické vlastnosti připravených kompozitů.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

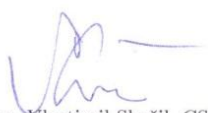
1. Skotheim T. A., Reynolds J. R.: Handbook of conducting polymers: Theory, synthesis, properties, and characterization, CRC Press, 2007
2. Xanthos M.: Functional Fillers for Plastic, Wiley, 2010
3. Internet

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Robert Vik**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku kompozitních materiálů s plnivý na bázi vodivých polymerů. První dvě kapitoly obsahují literární rešerši na téma kompozitních materiálů a polymerů s vlastní vodivostí. Práce dále obsahuje popis přípravy vzorků kompozitů s matricí z epoxidové pryskyřice plněné polyanilinem, který byl dopovaný kyselinou sírovou a kyselinou octovou. U vzorků kompozitů byly poté měřeny stejnosměrné a frekvenční charakteristiky. Poslední kapitola obsahuje vyhodnocení výsledků měření a diskuzi k nim.

Klíčová slova

Kompozitní materiály, vodivé polymery, polyanilin, epoxidová pryskyřice, epoxidová matrice, perkolační práh, vodivá plniva.

Abstract

The master thesis is concerned with the composite materials with fillers based on inherently conductive polymers. The first two chapters contain literature review of composite materials and intrinsically conductive polymers. The master thesis also describes the preparation of composite samples consisting of an insulating epoxy resin matrix and conducting polyaniline additives, which were doped by sulfuric and acetic acids. The electrical characteristics (DC and frequency) of the composite samples were measured and these measurements are evaluated and discussed in the last chapter.

Key words

Composite materials, conductive polymers, polyaniline, epoxy resin, epoxy matrix, percolation threshold, conductive fillers.

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 10.5.2012

Martin Zigler

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Robertu Vikovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych také rád poděkoval rodině a přátelům za veškerou podporu, kterou mi poskytli při studiu.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 7 |
| SEZNAM SYMBOLŮ | 8 |
| ÚVOD | 9 |
| 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY | 10 |
| 1.1 DĚLENÍ KOMPOZITŮ..... | 10 |
| 1.2 MATRICE | 12 |
| 1.2.1 Termoplasty..... | 12 |
| 1.2.2 Reaktoplastické pryskyřice | 13 |
| 1.3 PLNIVA | 15 |
| 1.3.1 Funkční plniva..... | 16 |
| 1.3.2 Elektricky vodivá plniva | 17 |
| 1.4 PERKOLAČNÍ TEORIE..... | 19 |
| 1.4.1 Základní perkolační model | 19 |
| 1.4.2 Vodivost kompozitů a perkolační práh..... | 21 |
| 2 VODIVÉ POLYMERY | 23 |
| 2.1 PRINCIP VODIVOSTI INTRIZITNĚ VODIVÝCH POLYMERŮ | 23 |
| 2.1.1 Chemická vazba a konjugace..... | 24 |
| 2.1.2 Transport náboje | 25 |
| 2.1.3 Dopování polymerů | 25 |
| 2.1.4 Stabilita konjugovaných polymerů..... | 26 |
| 2.2 ZÁSTUPCI KONJUGOVANÝCH POLYMERŮ | 27 |
| 2.2.1 Polyanilin | 28 |
| 2.3 OBLASTI VYUŽITÍ VODIVÝCH POLYMERŮ | 29 |
| 3 PŘÍPRAVA VZORKŮ KOMPOZITŮ | 30 |
| 3.1 SYNTÉZA POLYANILINU | 30 |
| 3.1.1 Dopování polyanilinu | 31 |
| 3.2 VÝROBA KOMPOZITŮ | 31 |
| 3.2.1 Epoxidová matrice LETOXIT PR 102..... | 32 |
| 3.2.2 Epoxidová matrice LETOXIT PR 108..... | 33 |
| 4 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ | 34 |
| 4.1 POUŽITÉ MĚŘICÍ METODY | 34 |
| 4.1.1 Stejnoseměrná měření | 34 |
| 4.1.2 Teplotní závislosti ztrátového činitele a permitivity..... | 35 |
| 4.1.3 Frekvenční charakteristiky | 36 |
| 4.2 VÝSLEDKY A DISKUZE K MĚŘENÍ..... | 37 |
| 4.2.1 Stejnoseměrné charakteristiky..... | 37 |
| 4.2.2 Teplotní závislost permitivity a ztrátového činitele..... | 39 |
| 4.2.3 Frekvenční charakteristiky | 41 |
| 5 ZÁVĚR | 45 |
| POUŽITÁ LITERATURA | 48 |
| PŘÍLOHY | I |
| NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY | I |
| OBRÁZKY VZORKŮ | XV |

Seznam symbolů

| | |
|--|---|
| T_g [°C] | teplota skelného přechodu |
| T_m [°C] | teplota tání krystalické fáze |
| V_k [%] | kritická koncentrace plniva (perkolační práh) |
| R_p [m] | průměr částí polymeru |
| R_k [m] | průměr kovových částic |
| p [%] | pravděpodobnost výskytu |
| P_∞ [%] | pravděpodobnost vzniku nekonečného úseku |
| p_k [%] | kritická pravděpodobnost (perkolační práh) |
| β, S [-] | kritický exponent |
| σ [S·cm ⁻¹] | měrná elektrická vodivost |
| σ_p [S·cm ⁻¹] | měrná elektrická vodivost plniva |
| V [%] | objemová koncentrace plniva |
| ρ [Ω·cm] | měrný elektrický odpor kompozitu |
| ρ_p [Ω·cm] | měrný elektrický odpor plniva |
| ρ_m [Ω·cm] | měrný elektrický odpor matrice |
| σ_0 [S·cm ⁻¹] | výchozí měrná elektrická vodivost |
| T [°C] | teplota |
| T_0 [°C] | výchozí teplota |
| n [-] | počet nosičů náboje |
| e [eV] | náboj elektronu |
| μ [cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹] | elektronová mobilita |
| hm.% [%] | hmotnostní koncentrace |
| M [mol·dm ⁻³] | molární koncentrace |
| ϵ_r [-] | dielektrická konstanta, relativní permitivita |
| $\text{tg } \delta$ [-] | ztrátový činitel |
| f [Hz] | frekvence |
| C [F] | kapacita |
| UV | ultrafialové |
| PVC | polyvinylchlorid |
| PAI | polyamidimid |
| PE | polyetylén |
| PEK | polyeterketon |
| PS | polystyren |
| PP | polypropylen |
| PC | polykarbonát |
| PET | polyetylén tereftalát |
| PTFE | polytetrafluoretylen (teflon) |
| PA | polyacetylen |
| PANI | polyanilin |
| PPy | polypyrrol |
| PT | polythiofen |
| PPP | poly(p-fenylen) |
| PPV | poly(p fenylenvinilen) |
| PEDOT | poly(3,4-ethylendioxtiofen) |

Úvod

Materiály tvořené z několika rozdílných složek, neboli takzvané kompozity, hrají v materiálovém inženýrství velmi důležitou roli. Předkládaná práce se zabývá problematikou těchto materiálů. Je zaměřena především na polymerní vodivé kompozity, s plnivem na bázi polymerů s vlastní elektrickou vodivostí, obsažených v polymerní nevodivé matici. Kompozity obecně kombinují užitečné vlastnosti více materiálů pouze do jednoho, jehož aplikace je pak možná i tam, kde by jeho jednotlivé složky samostatně selhaly. Klasické dielektrické polymery, používané například jako izolátory či pojiva pro mnohé kompozitní materiály, vynikají svou stabilitou a dobrými mechanickými a zpracovatelskými vlastnostmi. Na druhou stranu se polymery s vlastní vodivostí potýkají právě s potížemi, jako jsou špatná stabilita v okolním prostředí a nepoddajnost při zpracování. Proto je vhodné použít tyto polymery jako vodivé plnivo právě do matrice, která jim poskytne mechanickou i chemickou ochranu.

První dvě kapitoly jsou rešeršemi na danou problematiku. První kapitola je zaměřena na téma kompozitních materiálů, zejména na polymerní matrice a částicová vodivá plniva, a s nimi spjatou perkolační teorii. Druhá kapitola se celá věnuje problematice polymerů s vlastní vodivostí. Ve třetí kapitole je popsán postup syntézy a dopování polyanilinu, který patří mezi jedny z nejslibnějších vodivých polymerů, a dále příprava vzorků kompozitů s maticí z epoxidové pryskyřice, plněné právě práškovým polyanilinem. Čtvrtá kapitola obsahuje výsledky z měření vybraných elektrických vlastností, mezi kterými jsou vodivostní a volt-ampérové charakteristiky, teplotní závislosti ztrátového činitele a relativní permitivity a frekvenční charakteristiky.

1 Kompozitní materiály

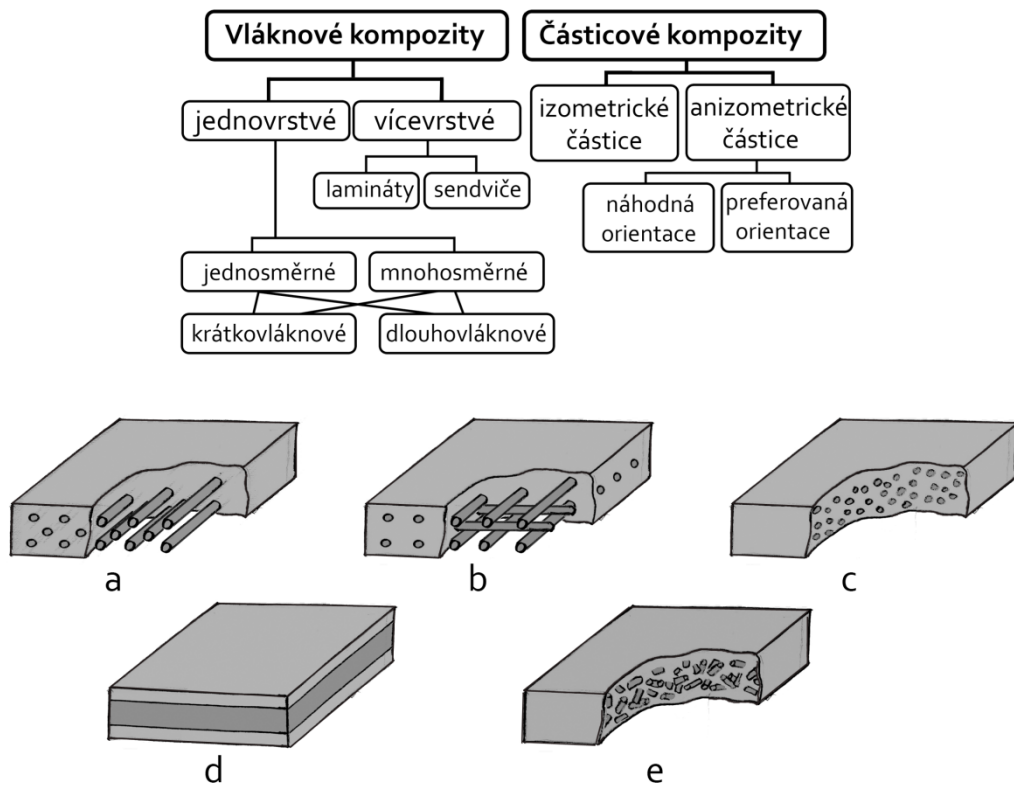
Již v pravěku, před několika tisíci lety, lidé objevili, že slitina mědi a cínu má vyšší tvrdost než tyto samostatné kovy, což vedlo k výrobě kvalitnějších nástrojů a zbraní a celá etapa díky tomu byla pojmenována jako doba bronzová. Od té doby lidé vyvíjí stále nové a lepší materiály, jež jsou nedílnou součástí technického pokroku. Pojem kompozit obecně označuje materiál, který je specifickým způsobem složen ze dvou nebo více komponent s výrazně rozdílnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Výsledný kompozitní materiál pak může dosahovat mnohem lepších vlastností, než mají jeho jednotlivé složky, tento jev se nazývá spolupracující neboli synergický efekt. Díky tomu můžeme vytvořit nespočetné množství materiálů s širokým spektrem užitných vlastností. Kontinuální nosná složka kompozitu se nazývá pojivo nebo matrice a nejčastěji se můžeme setkat s kovovou, keramickou nebo polymerní matricí. V objemu matrice je obsažen další materiál v podobě plniva, které zlepšuje funkční či fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitu. [1]

1.1 Dělení kompozitů

Asi nejzásadnější dělení kompozitních materiálů z hlediska jejich vlastností je podle geometrie a orientace plniva na vláknové a částicové kompozity, toto dělení je podrobněji zobrazeno na obr. 1.1. U vláknových kompozitů má plnivo především funkci výztuže, která kompozit zpevňuje a díky větší pevnosti a tuhosti je schopná nést veškeré napětí působící na materiál. Matrice zde pak slouží hlavně k přenosu vnějších napětí do výztuže, k udržení výztuže v požadovaném směru vůči napětí a k ochraně výztuže proti vnějším mechanickým či chemickým poškozením. Oproti tomu u částicových kompozitů nemá plnivo na mechanické vlastnosti tak velký vliv a hlavním nositelem mechanicko-fyzikálních vlastností bývá matrice. Vliv plniva na mechanické vlastnosti kompozitu je dán hlavně procentuálním obsahem, tvarem a velikostí částic plniva v materiálu [1]. V tomto ohledu nejsou tedy částicová plniva tak lukrativní jako ty vláknové, plnivo ovšem může modifikovat funkčnost materiálu i jinak, například změnou elektrických a magnetických vlastností kompozitu.

Podle rozdělení kompozitů na obr. 1.1 můžeme dále dělit vláknové kompozity na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity pak mohou mít vlákna orientována pouze v jednom směru nebo mohou být mnohosměrné a jejich orientace je pak buď náhodná či například dvousměrná v podobě tkaniny. Kromě orientace vláken se pak jednovrstvé

kompozity ještě dělí na krátkovláknové a dlouhovláknové, dlouhá vlákna jsou buď kontinuální přes celou délku nebo je poměr jejich délky a průměru větší než 100, při menším poměru se jedná o vlákna krátká. Vícevrstvé kompozity, ve kterých se střídají vrstvy s různou orientací výztuže, například v podobě tkané vyztužující rohože, se nazývají lamináty. Speciálním případem vícevrstvných kompozitů je vrstvená, takzvaně sendvičová, struktura, u které téměř zaniká rozdíl mezi matricí a plnivem, jelikož se skládá z více vrstev různých materiálů na sobě. Částicové kompozity pak mohou obsahovat izometrické nebo anizometrické (destičkové) částice. Anizometrické částice se vyznačují určitým aspektním poměrem délky a šířky těchto částic. [1,2] Na obrázku 1.1 jsou také znázorněny příklady některých těchto struktur.



Obr.1.1 - Rozdělení kompozitů z hlediska geometrie a orientace plniva a příklady některých struktur: a) jednosměrně orientovaný dlouhovláknový kompozit, b) kompozit s dvousměrnou výztuží (tkanina), c) částicový kompozit, d) vrstvený (sendvičový) kompozit, e) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny. [1,2]

Kompozity můžeme také dělit podle rozměrů plniva na makrokompozitní, mikrokompozitní a nanokompozitní materiály. V průmyslu mají největší využití mikrokompozity s rozměry vláken nebo částic dosahujícími největších příčných rozměrů v desítkách μm . Tyto materiály se oproti kovům vyznačují díky malé hustotě lepším poměrem

pevnosti v tahu a modulu pevnosti k hustotě. U nanokompozitů dosahují rozměry plniv velmi malých hodnot a délka částic nebo průměr výztuže se pohybuje v jednotkách nm. Makrokompozity se vyznačují obsahem plniva o větších rozměrech, nejčastěji od jednotek mm a jsou používané hlavně ve stavebnictví. Příkladem takového materiálu je železobeton. [2]

Vzhledem k zaměření této práce na měření elektrických vlastností kompozitů s epoxidovou matricí a různými plnivy na bázi polyanilinu, bude dále věnována pozornost hlavně částicovým kompozitům s polymerními matricemi a vodivými plnivy.

1.2 Matrice

Z hlediska dělení polymerních typů matric se používají dva základní druhy pryskyřic neboli pojiv, termoplasty a reaktoplastické pryskyřice. Převážnou část z toho pak tvoří hlavně termoplasty. [1]

1.2.1 Termoplasty

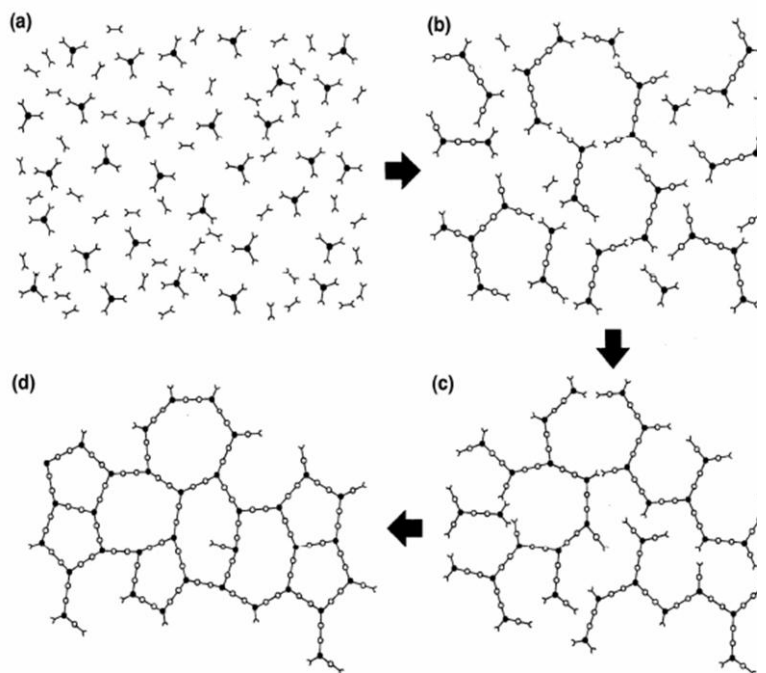
Termoplasty se dají dělit do dvou základních skupin, amorfní a semikrystalické. Amorfní termoplasty se vyznačují teplotou skelného přechodu T_g , po jejímž překročení dochází k poklesu elasticity a tekutosti plastu. Zpracování těchto plastů se obvykle provádí při teplotách vysoce převyšující T_g . Teplota T_g se pohybuje již od nízkých teplot, jako je 65 °C pro polyvinylchlorid (PVC), po teploty dosahující až 295 °C pro polyamidimid (PAI). Semikrystalické termoplasty obsahují různé stupně krystality v rozsahu 20 – 90% a zpracovávají se při teplotách přesahujících jak teplotu tání krystalické fáze T_m , tak teplotu skelného přechodu amorfní fáze T_g . Teplota tání T_m se pohybuje od hodnot 110 °C pro nízko objemový polyetylén (PE), až po 365 °C pro polyeterketon (PEK). [3]

Mezi zástupce termoplastů patří například polystyren (PS), polypropylen (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET), polyvinylchlorid (PVC) a další. Jejich struktura se vyznačuje makromolekulami tvořenými opakováním stejných strukturálních jednotek. [1]

1.2.2 Reaktoplastické pryskyřice

U reaktoplastických pryskyřic při vytvrzování dochází k chemickým reakcím, majícím za následek síťování, díky kterému dochází k trvalému vytvrzení polymeru. Na rozdíl od termoplastů je tento proces nevratný, a opětovným zahřátím se již nedají roztavit, ale pouze poškodit. Proces zesíťování je většinou aktivován teplem, proto jsou tyto pryskyřice v mnohé literatuře, hlavně starší, označovány jako termosety. Výraz termoset pochází z anglických slov thermal (tepelná) a set (fixace, příprava). Jelikož kromě tepla může být síťování iniciováno také zářením či působením katalyzátorů [4], ujal se spíše novější označení reaktoplastické pryskyřice. Většinou jsou dodávány jako nízkoviskózní tekutiny s konzistencí podobné řídkému medu a skládají se z malých molekul tvořících monomery či oligomery, které se poté chemicky vytvrzují nejčastěji přidáním katalyzátoru a iniciátoru, pro urychlení většinou i při zvýšené teplotě [1]. Při procesu síťování dochází ke zvyšování viskozity, vlivem nárůstu molekulární hmotnosti. Nezvratný přechod z tekutého do gelového stavu se nazývá bod gelace [4]. Proces vytvrzení je znázorněn na obr. 1.2.

Mezi reaktoplastické pryskyřice patří například epoxidové, nenasycené vinylesterové, fenolické pryskyřice, bismaleimidy, melaminy nebo silikony. Některé reaktoplasty se díky jejich křehkosti nedají ani použít samostatně bez smíchání s plnivý. [3] Dále jsou blíže popsány některé často používané reaktoplastické pryskyřice pro matrice, mezi nimi i epoxidové pryskyřice používané v této práci.



Obr. 1.2 – Zjednodušené dvourozměrné schéma procesu vytvrzení reaktoplastu. (a) Monomery a oligomery. (b) Proces růstu a větvení při zvyšování viskozity. (c) Gelový stav za nevratným bodem gelace. (d) Plně vytvrzený reaktoplast. [4]

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice**

Roztok nenasycených polyesterů se skládá z lineárních mono- či oligomerů obsahujících reaktivní dvojnou C=C vazbu, jsou to tedy takzvané polyfunkční oligomery. Pro zpracování je nutné snížit viskozitu použitím vhodného reaktivního rozpouštědla, schopného stejného typu polymerační radikálové reakce jako nenasycený polyester. Nejčastěji se jako reaktivní rozpouštědlo používá styren. Při procesu vytvrzování je díky volným peroxidovým radikálům, které vznikají termickým štěpením organických diperoxidů, iniciována síťovací radikálová reakce. Tento proces pak probíhá rozpadem reaktivních dvojných vazeb a vznikem jednoduchých chemických C-C vazeb, mezi molekulami oligoesteru a styrenu. Pro dosažení přijatelné rychlosti, je tedy nutno vytvrzování provádět při zvýšené teplotě. Aby bylo možno dosáhnout technologicky kontrolovatelného procesu, obvykle se pro vytvrzování používají iniciátory. Ty produkují radikály s přesně danými rozpadovými rychlostmi při velmi přesně definovaných teplotách. Snížení vytvrzovací teploty lze dosáhnout přidávkem katalyzátoru a akcelerátoru. Při skladování nenasycených polyesterů je ještě nutné přidání inhibitorů, které zabrání samovolnému vytvrzování monomerů, zapříčiněnému tvorbou volných radikálů. [1] Tyto pryskyřice patří mezi jedny z nejpoužívanějších reaktoplastů pro matrice hlavně díky jejich relativně nízké ceně, lehké váze a přijatelným mechanickým vlastnostem. Často se používají například v automobilových aplikacích. Jako většina reaktoplastů jsou ovšem křehké a náchylné na poškození. [5]

- **Vinylesterové pryskyřice**

Vytvrzování vinylesterů se provádí použitím stejných systémů jako pro nenasycené polyestery, stejně jako u nich probíhá radikálovou polymerací dvojných C=C vazeb. Rychlost vytvrzování je za stejných podmínek oproti polyesterům mírně horší, naproti tomu je u vinylesterů po vytvrzení zanedbatelná zbytková koncentrace nenasycených dvojných vazeb mezi uhlíky. To je činí více odolné vůči UV záření, ale také stabilnější v kyselém i zásaditém prostředí a odolnější při vystavení povětrnostním vlivům. Ve srovnání s polyestery mají také lepší mechanické vlastnosti a vydrží větší namáhání. Vinylesterové pryskyřice jsou tedy vhodné pro náročné aplikace a to i v chemicky agresivním prostředí. V určitých aplikacích, kde nejsou vyžadovány speciální elektrické a tepelné vlastnosti, mohou nahradit i dražší epoxidové pryskyřice. Oproti epoxidům mají vinylestery také kratší dobu vytvrzování. [1]

- **Epoxidové pryskyřice**

Jedná se o sloučeniny obsahující v molekule epoxidovou skupinu. Díky epoxidovému kruhu, který se otevírá působením velkého počtu látek, je tato skupina velmi reaktivní. V porovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi mají ty epoxidové lepší přilnavost k povrchově neupravené skelné výztuži a také vykazují lepší mechanické a elektrické vlastnosti. Další výhodou jsou dobré elektroizolační vlastnosti v široké škále teplot, dobrá odolnost proti vodě, roztokům alkálií, kyselin a rozpouštědlům. Epoxidové pryskyřice se tak hojně používají v lepidlech, zalévacích a lisovacích hmotách, pojivech pro lamináty a v lékařských pryskyřicích. Pro výrobu epoxidových kompozitů je také velmi výhodné malé polymerační smršťování při vytvrzování (okolo 2%), jelikož se při tomto procesu neodštěpují vedlejší produkty. K vytvrzování epoxidových pryskyřic lze použít několik metod podle konečného účelu použití pryskyřice, tyto metody jsou polyadice, polykondenzace a polymerace. Vytvrzení může probíhat i za pokojové teploty, ale tímto způsobem většinou probíhá velice dlouho, proto se používá ještě dotvrzování za teploty vyšší než T_g (obvykle 120 - 250 °C). [1]

- **Fenolické pryskyřice**

Fenolické pryskyřice se vyznačují vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. Nejčastěji vznikají reakcí fenolu s formaldehydem. Oproti nenasyceným polyesterům lze tyto pryskyřice skladovat poměrně dlouhou dobu bez ztráty vlastností a schopnosti síťovat. Velkou výhodou kompozitů s fenolickými matricemi je výrazně snížená hořlavost a dobrá odolnost proti vysokým teplotám. Fenolické pryskyřice se typicky zpracovávají při teplotách v rozsahu od 150 do 210 °C, podle typu dané metody. [1]

1.3 Plniva

Jak již bylo zmíněno, plniva zastávají v kompozitech funkci přídavného materiálu obsaženého v objemu matrice. Hlavním důvodem proč se začala přidávat různá plniva do plastů, bylo snížení ceny materiálu nahrazením drahého polymeru levnější náhražkou, přičemž nevhodný tvar a chemické složení takových plniv můžou jenom lehce zvýšit elasticitu polymeru a jeho pevnost dokonce i zmenšit. [3]

Kromě ekonomických důvodů se ale plniva používají také pro změnu fyzikálních vlastností kompozitu, kde již neplní roli levnější náhražky, ale mohou být i jeho hlavní složkou. V tomto případě hovoříme o takzvaných funkčních plnivech.

1.3.1 Funkční plniva

Funkční plniva ovlivňují celou řadu vlastností kompozitů a v některých případech navíc hovoříme o takzvaných multifunkčních plnivech, protože mohou mít celou řadu vedlejších funkcí. Částečková plniva nemají, na rozdíl od vláknových, velký vliv na modifikaci mechanických vlastností, ale mezi jejich hlavní funkce patří zvýšení odolnosti proti ohni, úprava elektrických a magnetických vlastností, modifikace povrchových vlastností nebo vylepšení a kontrola zpracovatelských vlastností [3]. Tabulka 1.1 popisuje hlavní a vedlejší funkce s příklady příslušných plniv. Kromě částečkových obsahuje i příklady některých vláknových plniv.

Tabulka 1.1 - Funkce a příklady používaných funkčních plniv pro polymerní matrice. [3]

| Hlavní funkce | Příklady plniv | Vedlejší funkce | Příklady plniv |
|---|--|----------------------------------|---|
| modifikace elektrických a magnetických vlastností | <i>vodivé, nevodivé a feromagnetické</i> : kovy, uhlíková vlákna, saze a slída | rozložitelnost | <i>organická plniva</i> : škrobová a celulózoová vlákna, některé polymery |
| zvýšení ohnivzdornosti | <i>hydratovaná plniva</i> : hydroxid hlinitý a hydroxid hořečnatý (brucit) | bioaktivita | <i>regenerace kostí</i> : hydroxylapatit, fosforečnan vápenatý a křemičitá skla |
| modifikace povrchových vlastností | <i>antiblokační, lubrikační</i> : křemen, uhličitan vápenatý, PTFE (teflon), sulfid molybdeničitý a grafit | absorbce radiace | částice kovů, oxid olovnatý a olovnaté skla |
| zlepšení zpracovatelských vlastností | <i>tixotropní látky, tvrdidla, zahušťovadla, a kyselinové eliminátory</i> : koloidní oxid křemičitý, bentonity a hydrotalcit | zlepšená dimenzionální stabilita | <i>izotropické smršťování a redukce deformace</i> : částečková plniva, skleněné kuličky a slída |
| | | modifikace optických vlastností | Nukleátory, projasňovače, a perleťová barviva: jemné částice a hybridní částice slída/barvivo |
| | | regulace vlhnutí | vločková plniva, sklo, barit (BaSO ₄) |
| modifikace mechanických vlastností | <i>vláknové</i> : skleněná vlákna, slída, uhlíkové nanotrúbky, uhlíková/grafitová vlákna, aramidová/syntetická/přírodní vlákna; <i>částicové</i> : mastek, uhličitan vápenatý, kaolin, dřevěná moučka, wollastonit (CaSiO ₃) a skleněné koule | regulace prostupnosti | <i>snížená prostupnost</i> : slída, mastek, vrstvené silikáty a skelné vločky <i>zvýšená prostupnost</i> : uhličitan vápenatý, rozptýlené polymery |

1.3.2 Elektricky vodivá plniva

Polymerní kompozity jsou díky kombinaci jednoduché zpracovatelnosti a dobrých izolačních a dielektrických vlastností preferované materiály pro velké množství zařízení a aplikací. Pro některé aplikace jsou ale velmi vhodné i vodivé kompozity, v určitých situacích mohou polymery sloužit například ke svodu elektrostatického náboje nebo pro odstínění elektromagnetického pole [6]. Těchto vlastností lze dosáhnout právě přidáním vodivých plniv do polymerní matrice, výhoda takových kompozitů oproti polymerům s vlastní vodivostí je hlavně zvýšená odolnost proti vnějším chemickým vlivům. Nejpoužívanější vodivé plnivo pro polymerní matrice jsou saze, dalšími vhodnými plnivy jsou například kovové částice a polymery s vlastní vodivostí. U kompozitů s vodivými plnivy je určitá kritická koncentrace plniva V_k , od které začíná být celý materiál vodivý. Tuto problematiku lze vysvětlit perkolační teorií, která je podrobněji vysvětlena v kapitole 1.4.

- **Saze (uhlíková čern)**

Saze jsou jedním z komerčně nejdůležitějších a nejprodukovanějších plniv pro polymery, a to díky jejich širokému použití jako prostředku pro vyztužování elastomerů, hlavně při výrobě pneumatik. U elastomerů se saze používají jako plnivo ve větších koncentracích a zlepšují mnoho vlastností, jako jsou pevnost v tahu, tvrdost, tuhost, odolnost proti odření a dynamické vlastnosti. U termoplastů se přidávají v menších koncentracích z důvodu zlepšení jejich stability v okolním prostředí. Speciální aplikací je pak použití sazí jako elektricky vodivého plniva pro antistatické kompozity s termoplasty a reaktoplasty. [7] Díky jejich širokému využití jsou saze velmi podrobně popsány v mnohých publikacích, v této práci se jimi ale již nebudu podrobněji zabírat.

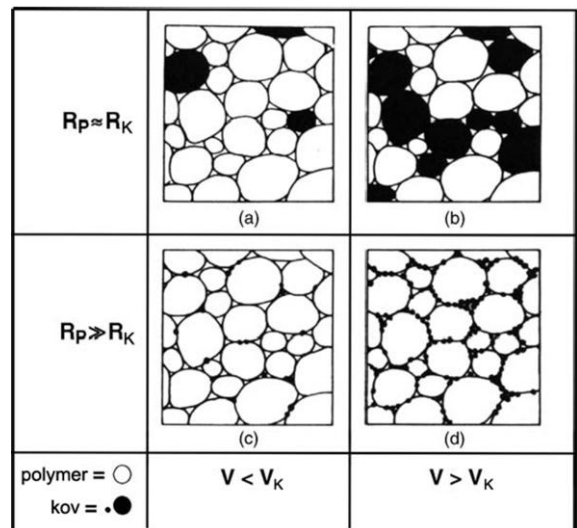


Obr. 1.3 – Ukázka sazí.[8]

- **Kovové částice**

U většiny polymerů lze zvýšit vodivost přidáním plniva v podobě kovových částic, je ale velmi důležité dát si pozor na specifickou kombinaci materiálů kompozitu. Například přidáním mědi do polykarbonátu se značně zvyšuje jeho degradace. [6] Přes vysokou vodivost kovů je u nich nevýhodou jejich sklon k oxidaci, vedoucí k vytvoření korozních

vrstev snižujících vodivost. [9] U některých polymerů dochází při vytvrzování k separaci fází, tento proces přispívá k segregaci kovových částic na rozhraní částí polymeru nebo v nekystalických regionech. Díky takovému rozložení vodivého plniva lze dosáhnout poměrně malých kritických koncentrací V_k . Na obr. 1.4 je porovnáno rozložení kovových částic plniva, zhruba stejně velkých jako jsou částice matrice a segregovaných menších částic plniva. [6]



Obr.1.4 – Normální a segregované rozložení kovových částic v polymerní matrici, před a po perkolačním prahu. [6]

- **Polymery s vlastní vodivostí**

Jasná výhoda plniv na bázi vodivých polymerů a polymerních matric je ta, že se jedná o strukturou velmi podobné látky. Již od objevení vlastní vodivosti v polymerech se však tyto látky potýkají s problémy, jako jsou špatná stabilita a zpracovatelnost. Řešení této problematiky se nabízí v použití těchto polymerů jako plniv pro nevodivé polymery, běžně používané pro matrice v kompozitech. Vzhledem k zaměření práce se problematice vodivých polymerů dále věnuje celá kapitola 2.

- **Další vodivá plniva na bázi uhlíku**

Velmi vhodným vodivým plnivem jsou uhlíkové nanotrubičky, vynikající unikátními strukturálními a elektrickými vlastnostmi. Díky tomu lze docílit vodivosti kompozitu při velmi nízkých koncentracích plniva. Velkou nevýhodou je ovšem náročné rozptýlení nanotrubek v tekutých polymerech, pro jejich širší využití jako plniv je tedy nutné najít ekonomicky výhodnější technologický postup výroby takových kompozitů. [6]

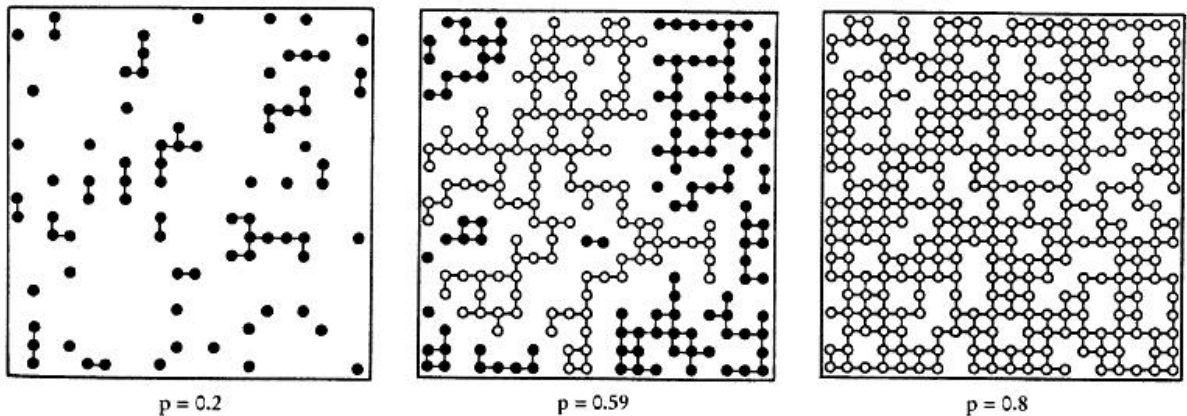
Mezi uhlíková vodivá plniva patří také grafit, který zachovává nebo vylepšuje mechanické vlastnosti kompozitu. Dalším používaným plnivem jsou uhlíková vlákna, která v kombinaci s jinými plnivy jako jsou grafitový prášek nebo saze, vykazují ještě lepší vlastnosti, a to díky dominanci efektu ze zvětšeného vnitřního mezifázového rozhraní. [6]

1.4 Perkolační teorie

Perkolační teorie je jednoduchý pravděpodobnostní model pro neuspořádané systémy, který popisuje systém ve statistice nazývaný jako fázový přechod, to znamená, že se v určitém zlomovém okamžiku (perkolační práh) zcela změní jeho chování. Jedná se o nejjednodušší model ze skupiny takzvaných náhodně sdružovacích (random cluster) nebo Fortuin-Kasteleynových modelů, jejichž studie se také navzájem ovlivnily. Kromě perkolačního modelu do této skupiny patří například i Isingův model pro magnetismus. [10] Perkolační teorie je velmi univerzální a lze ji využít v mnoha oblastech, od přenosu náboje v amorfních médiích a kompozitech, po určení vlastností složitých polymerů, gelů a iontových vodičů. Vzhledem k tomu ale neexistuje univerzální model aplikovatelný pro všechny situace a výsledek vždy záleží na specifických podmínkách. [11] Princip této teorie je vysvětlen v následující kapitole na základním perkolačním modelu.

1.4.1 Základní perkolační model

Základní model si můžeme představit na čtverci obsahujícím mřížku, ve které každá spojnice může být s pravděpodobností p zaplněná, či může být s pravděpodobností $(1-p)$ prázdná. Zaplněné a prázdné spojnice představují dva různé stavy, pro názornost si můžeme představit všechny zaplněné spojnice jako body znázorňující vodiče a prázdné spojnice jako izolační mezery, přičemž proud prochází pouze přes těsně sousedící vodiče. Tento model pak představuje materiál, který je vodivý pokud jsou spojeny dvě protilehlé strany čtverce vodivou cestou, v opačném případě je to izolant. Tento princip je znázorněn na obrázku 1.4, kde jsou všechny těsně sousedící vodiče propojeny spojnicemi představujícími vodivé vazby. S rostoucí pravděpodobností p a tedy i s rostoucí koncentrací zaplněných spojnic se vodiče shlukují do skupin tvořících vodivé úseky uvnitř čtverce. Při malých hodnotách pravděpodobnosti p obsahuje materiál pouze několik malých a navzájem izolovaných vodivých úseků, s rostoucím p se pak počet a velikost těchto úseků zvětšuje a při pravděpodobnosti $p = 1$ obsahuje materiál pouze vodiče. Někde mezi těmito extrémy pak definujeme kritickou pravděpodobnost p_k , od které je možné, aby existoval vodivý úsek spojující dvě protilehlé strany, tato hodnota se pak nazývá perkolační práh. [10,11]



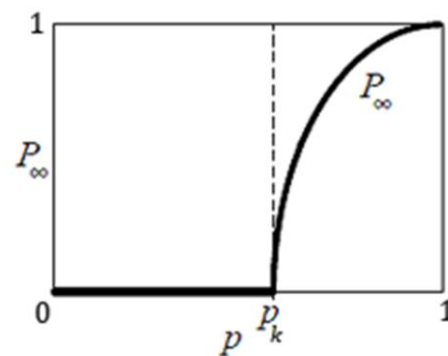
Obr. 1.4 - Perkolace ve čtvercové mřížce. Zaplněné spojnice (vodiče) v těsné blízkosti jsou propojeny vodivými vazbami. Černá kolečka představují konečné vodivé úseky a prázdná kolečka představují úseky spojující dvě strany (tzv. nekonečné úseky).[11]

Vodivé skupiny spojnic izolované uvnitř mřížky nazýváme konečné úseky a skupiny tvořící vodivé cesty mezi protilehlými stranami čtverce, díky nimž se z celého materiálu stává vodič, nazýváme nekonečné úseky. Existuje tedy pravděpodobnost P_∞ , jejíž hodnota nám říká, s jakou šancí vznikne v materiálu nekonečný vodivý úsek, v závislosti na pravděpodobnosti p a tím pádem i na koncentraci vodivých bodů. Na obrázku 1.5 je znázorněna přibližná závislost pravděpodobnosti P_∞ na pravděpodobnosti koncentrace vodičů p . Pokud je hodnota p menší než p_k , hodnota P_∞ je rovna nule, pokud ovšem hodnota p překročí kritickou úroveň, pravděpodobnost P_∞ roste a tento růst se dá vyjádřit jako:

$$P_\infty \sim (p - p_k)^\beta \quad (1)$$

Tento vztah je ovšem pouze přibližný a hodnota kritického exponentu β závisí na rozměrech mřížky, u dvourozměrné mřížky β odpovídá $5/36$ [11]. Vlastnosti tohoto modelu pro hodnoty $p < p_k$ a $p > p_k$ se tedy výrazně liší, ve statistice se takovými systémům, u kterých vede překročení kritické hodnoty určitého parametru ke změně

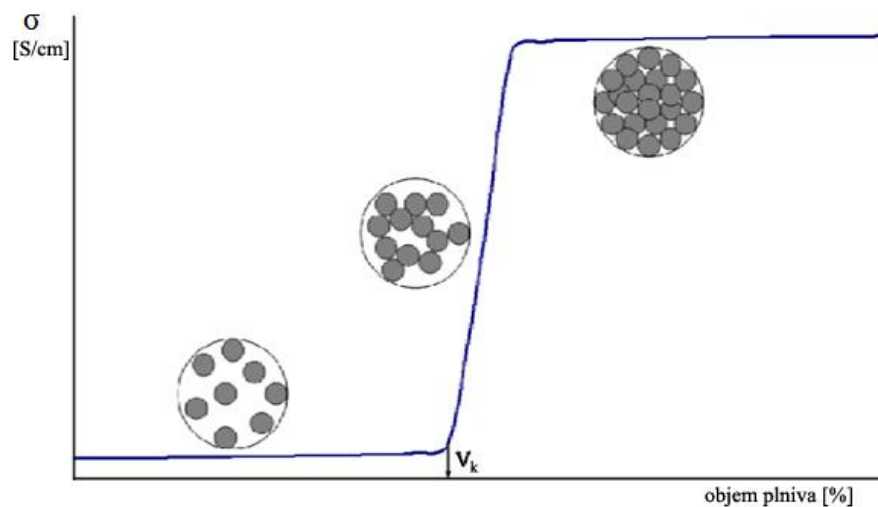
globálního chování celého systému, říká *fázový přechod* nebo také *kritický fenomén*. [10] V následující kapitole je popis aplikace této teorie při popisování vodivosti kompozitních materiálů v závislosti na koncentraci vodivého plniva.



Obr. 1.5 - Graf závislosti pravděpodobnosti P_∞ na pravděpodobnosti koncentrace p . [11]

1.4.2 Vodivost kompozitů a perkolační práh

U polymerních kompozitních materiálů s vodivými plnivy lze pomocí perkolační teorie vyjádřit závislost vodivosti celého kompozitu na koncentraci objemu plniva. Názorný graf této závislosti je znázorněn na obr. 1.6. Dokud objem plniva v kompozitu nedosáhne takzvaného perkolačního prahu neboli kritické koncentrace V_k , plnivo nemá na vodivost téměř žádný vliv, po překročení této hranice se ovšem vodivost začne prudce zvyšovat s pouze malým přírůstkem objemu plniva až na maximální hodnotu.



Obr. 1.6 - Závislost vodivosti kompozitu na koncentraci vodivého plniva. [12]

Závislost vodivosti celého kompozitu se dá vyjádřit, v analogii s pravděpodobnostním perkolačním modelem, pomocí vztahu:

$$\sigma = \sigma_p \cdot (V - V_k)^S \quad (2)$$

σ_p je vodivost plniva, V je objem plniva v materiálu a V_k je kritická hodnota objemu plniva [12]. Exponent S závisí na rozměrech mřížky a také na vlastnostech plniva.

Existuje několik perkolačních modelů vodivosti, které zahrnují různé faktory ovlivňující vodivost kompozitu. Tyto faktory jsou hlavně velikost a tvar plniva, orientace plniva a povrchové vlastnosti plniva i matrice. Vztah 2 je statistický perkolační model vodivosti, založený na bázi pravděpodobnosti výskytu vodivých cest, v praxi je ale tento model velice nepřesný. Novější modely mají podobnou formu, ale jsou složitější a přesnější. Podobnou formu jako klasický statistický model má například model navržený McLachanem:

$$\frac{(1-V)\left(\rho^{\frac{1}{t}}-\rho_p^{\frac{1}{t}}\right)}{\rho^{\frac{1}{t}}+\left(\frac{1-V_k}{V_k}\right)\rho_p^{\frac{1}{t}}} + \frac{V\left(\rho^{\frac{1}{t}}-\rho_m^{\frac{1}{t}}\right)}{\rho^{\frac{1}{t}}+\left(\frac{1-V_k}{V_k}\right)\rho_m^{\frac{1}{t}}} = 0 \quad (3)$$

Tento model vyjadřuje vztah mezi odpory kompozitu ρ , plniva ρ_p a matrice ρ_m , a dále ještě objemovou koncentrací plniva V a kritickou perkolační koncentrací V_k . Termodynamický model například respektuje mezipovrchové napětí a povrchovou energii složek kompozitu. Tento model navrhl Ye. P. Mamunya a je založen na tom, že volné povrchové energie složek kompozitu ovlivňují interakci mezi nimi. Materiály s podobnou povrchovou energií mají lepší smáčivost, a dochází tedy k lepšímu prolnutí matrice s plnivem. To může zlepšit celkovou vodivost kompozitu. Pokud tedy chceme kompozity s velkou vodivostí, rozdíl povrchových energií jednotlivých složek by měl být co nejmenší. Dalšími speciálními modely jsou geometrické perkolační modely, které kromě vodivosti zahrnují i parametry závislé na velikosti a tvaru částic plniva. U anizometrických částic hraje také výraznou roli orientace plniva, kdy může dojít například k převládnutí vodivosti pouze v určitém směru (anizotropní vodivost). Pro tyto případy existují takzvané strukturálně orientované perkolační modely, které jsou ale poměrně nepřesné, jelikož nerespektují mezipovrchové napětí z termodynamického modelu. [13]

2 Vodivé polymery

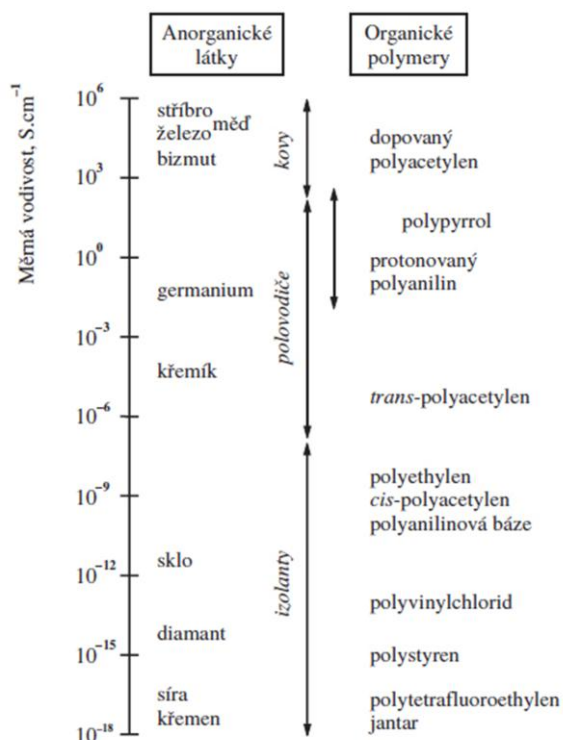
Polymery jsou syntetické organické látky, hojně používané pro své dobré mechanické vlastnosti a snadné zpracování. Jsou známé především jako elektrické a tepelné izolanty či vrstvy tlumící zvuk. [14] Příkladem toho může být polyvinylchlorid (PVC), používaný v elektrotechnice jako velmi kvalitní izolant elektrických kabelů.

Polymery s vlastní vodivostí představují novou třídu materiálů, kombinující vhodné zpracovatelské vlastnosti polymerů s elektrickými vlastnostmi typickými pro běžně používané polovodiče a vodiče, za jejíž objev a rozvoj byla udělena Nobelova cena za chemii za rok 2000 chemikům Alanu G. MacDiarmidovi, Hideki Shirakawovi a fyzikovi Alanu J. Heegerovi. Vodivost těchto polymerů se obvykle pohybuje v rozmezí od 1 do $1000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$, to je přibližně na rozmezí vodivosti polovodičů a kovů, přičemž vodivost ostatních organických materiálů bývá obvykle menší než $10^{-10} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (viz obr. 2.1). [15]

U polymerů s vlastní vodivostí, dochází k pravidelnému střídání jednoduchých a dvojných vazeb (tzv. konjugace) v jejich molekulární struktuře. Dobré vodivosti polymerů může být také docíleno přípravou kompozitních materiálů s vodivými plnivy (viz. kapitola 1.3.2). Při použití konjugovaného polymeru jako vodivého plniva do nevodivého polymeru, můžeme vytvořit organický vodivý materiál, synergicky kombinující potřebné fyzikální vlastnosti obou polymerů.

2.1 Princip vodivosti intrinzičně vodivých polymerů

Mechanismus transportu náboje ve vodivých polymerech je odlišný od klasického přenosu náboje u kovů a izolátorů. Princip vodivosti v pevných látkách popisuje takzvaná



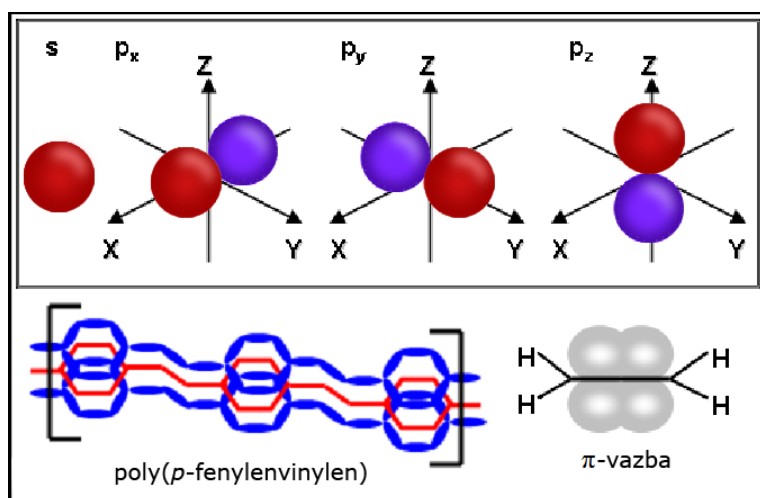
Obr.2.1- Porovnání měrné elektrické vodivosti [15]

pásová teorie vodivosti, která je založena na pohybu valenčních elektronů mezi energetickými pásy, neboli určitými energetickými hladinami, které elektrony v atomu zaujímají. Aby materiál mohl vodit, musí elektron přejít z valenčního do vodivostního pásu. Tyto pásy jsou v případě izolantů a polovodičů odděleny zakázaným pásem, jenž musí elektron překonat.

Chemická struktura kovů je poměrně odolná vůči mírnému neuspořádání, protože se vyznačuje hustou periodickou mříží iontů s valenčními elektrony, a jsou tedy dobře popsány právě pomocí pásové teorie. Oproti tomu se polymery vyznačují méně stabilní strukturou a jsou poddajnější při reakci na různé externí podněty. V případě vodivých polymerů je náboj transportován podél jejich řetězců a to hlavně díky konjugovanému systému vazeb, přesný model transportního mechanismu nebyl ale ještě zcela objasněn. [15]

2.1.1 Chemická vazba a konjugace

Většina běžných polymerů má řetězce obsahující pouze základní σ -vazby s velkým zakázaným pásem, náboje vytvořené podél jejich řetězců nejsou tím pádem mobilní a tyto materiály jsou tak dobrými izolanty [16]. Konjugované polymery mají díky p_z orbitalům atomů řetězce rozšířený π -konjugovaný vazební systém (obr. 2.2), zaručující potřebnou mobilitu náboje podél jejich řetězců [12]. Obvykle mají ale konjugované polymery velký energetický rozdíl mezi plně zaplněným valenčním π -pásem (HOMO - highest occupied molecular orbital) a prázdným vodivostním π^* -pásem (LOMO - lowest unoccupied molecular orbital). V jejich neutrální formě se tedy chovají jako polovodiče. Většina těchto látek je zbarvená z důvodu velké absorpce viditelného spektra spojené s π - π^* přechodem. [17]



Obr. 2.2 - Překrývání p_z orbitalů vede k π -konjugaci a k vodivosti. [12]

2.1.2 Transport náboje

Problém popsání přesného mechanismu přenosu náboje leží ve snaze vystopovat dráhu nosičů náboje uvnitř polymeru. Jelikož jsou polymery vysoce neuspořádané systémy, obsahující jak krystalické tak i amorfních fáze, je kromě transportu podél řetězců polymeru nutno uvažovat i transport pomocí komplexních vazeb mezi těmito fázemi. Studií konduktivity polymerů v závislosti na teplotě, frekvenci, proudu, magnetismu a stupně dopování bylo ověřeno, že mechanismů transportu náboje existuje hned několik. Hlavní mechanismus spočívá v přenosu nosičů náboje podél řetězce polymeru díky střídání jednoduchých a dvojných vazeb v tomto řetězci. Samotný π -konjugovaný vazební systém je totiž důvod, proč jsou ve své neutrální formě konjugované polymery polovodiče, v dopovaném stavu pak dosahují téměř konduktivity vodičů (viz. dopování polymerů). K přenosu náboje také dochází mezi vodivými doménami, které vznikají díky nehomogennímu dopování vytvářejícímu vodivé ostrůvky izolované uvnitř nevodivé matrice. K transportu náboje mezi těmito doménami dochází i díky tepelně aktivovaným přeskokům nebo tunelování. [18] Tyto mechanismy odpovídají teplotní závislosti měrné vodivosti σ :

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp [-(T_0/T)^{1/(d+1)}] \quad (4)$$

d je dimenze vzorku a σ_0 a T_0 jsou jeho výchozí parametry, u třírozměrných vzorků je exponent roven 1/4 ($d=3$) a jedná se o Mottův vztah teplotní závislosti konduktivity. U řady polymerů bylo experimentálně i teoreticky zjištěno, že tento exponent v teplotní závislosti je roven 1/2, to odpovídá přenosu náboje podél jednorozměrného molekulárního řetězce ($d=1$). Pro přesné popsání modelu transportního mechanismu je ale potřeba ještě mnoho dalších výzkumů, jako například měření závislosti vodivosti na intenzitě elektrického pole, teplotní a frekvenční závislosti permitivity, koncentrace nepárových spinů či zkoumání struktury pomocí rentgenového záření. [15]

2.1.3 Dopování polymerů

Pro dobrou vodivost polymerů jsou důležité dva požadavky. Jedním z nich je vysoká mobilita, kterou zaručuje konjugovaný systém elektronů, pomocí nichž jsou mezi sebou molekuly v řetězcích vázány. Dalším požadavkem je vysoký počet nosičů náboje, jak plyne ze vztahu pro měrnou elektrickou vodivost v pevných látkách σ :

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu \quad (5)$$

kde n je počet nosičů náboje, e je náboj elektronu a μ je mobilita. Nově připravené polymery

ovšem obsahují malé množství nosičů náboje, a proto je i přes velkou mobilitu jejich vodivost poměrně malá. [19] Zvýšení vodivosti zvětšením počtu nosičů náboje může být provedeno procesem, nazývaným podle analogie s klasickými polovodiči "dopování", který spočívá v úpravě chemického složení přidáním oxidačního či redukčního činidla. [15]

- **Způsoby dopování**

Proces chemického dopování tedy spočívá buď v přidávání elektronů do vodivostního pásu polymeru pomocí redukčních činidel (alkalické kovy) nebo odebíráním elektronů z valenčního pásu polymeru pomocí oxidačních činidel (halogeny, AsF_5 , FeCl_3 , HClO_4 a další kyseliny). Nevýhodou některých takto připravených polymerů ovšem bývá nestabilita při vystavení okolnímu vzduchu. Jiný vhodný způsob přípravy vodivých polymerů je elektrochemická polymerace, při které je provedena polymerace z monomeru a zároveň oxidace v jednom kroku. Tyto polymery jsou pak elektricky vodivé a poměrně stálé hned po jejich přípravě. [19]

Další metodou dopování polymerů je iontová implantace, spočívající v bombardování polymeru paprskem iontů o energii v rozmezí od 10 keV, kdy jsou ionty implantovány pouze pod povrch, až po energii $\approx 2\text{MeV}$, umožňující implantování skrz celou tloušťku vrstvy polymeru. Výhodou této metody je stabilita vodivosti těchto polymerů v okolním prostředí. Proces implantace o příliš vysokých parametrech ovšem zapříčiňuje degradaci materiálu a dochází k jeho poškození, při nízké energii a dostatečně malém toku lze ovšem dosáhnout organických polovodičů se všemi výhodami iontové implantace, která umožňuje řízený proces vnitřního dopování. Vývoj konkurenceschopných zařízení využívající tuto technologii je ale ještě v počátcích a bude vyžadovat větší mobilitu a také vylepšené polymery jako např. oligomery či orientované polymery. [20]

2.1.4 Stabilita konjugovaných polymerů

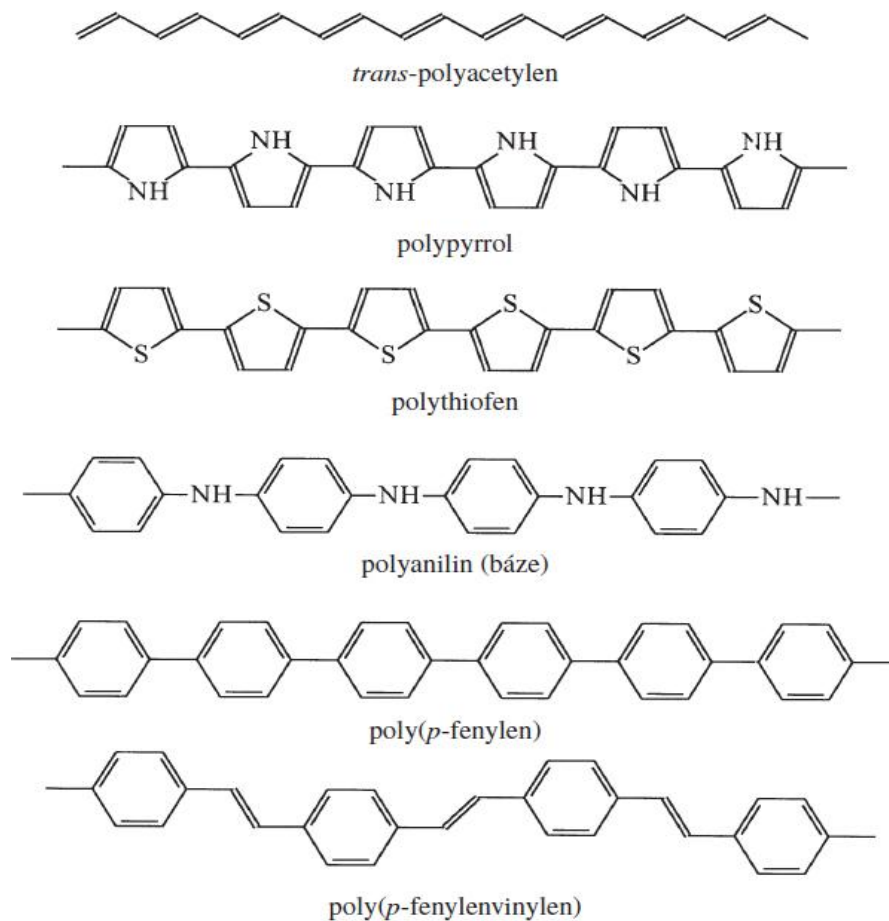
Již od objevení vodivých polymerů mají tyto materiály díky své struktuře problémy se stabilitou. Hlavně v dopované formě bývají tyto polymery náchylné na reakce s okolními látkami, jako jsou kyslík, voda nebo peroxidy. Dopované řetězce jsou totiž náchylné na reakce s nukleofily, elektrofilny a volnými radikály. Nyní jsou již ale vyvinuty vodivé polymery s poměrně dobrou stabilitou i v dopované formě. Náchylnost vodivých polymerů na okolní chemické prostředí lze ovšem v mnohých aplikacích prakticky využít. [18]

Vnitřní nestabilita těchto materiálů může být ale způsobena také stárnutím polymerů,

vlivem času u nich dochází k degradování struktury i bez vlivu reakcí s okolními činidly. Díky vnitřním reakcím nábojů v řetězci polymeru může docházet ke vzniku hybridizovaných orbitalů uhlíku sp^3 , které přeruší konjugaci. Polymery mohou také ztrácet dopanty vlivem teploty. [18]

2.2 Zástupci konjugovaných polymerů

Nejjednodušším zástupcem vodivých polymerů je polyacetylen (PA), jehož zajímavé elektrické vlastnosti a schopnost tvořit vodivé deriváty pomocí procesu dopování stáli za zrodem vodivých polymerů. Od objevení polyacetyleny bylo vydáno mnoho publikací zabývajících se jeho fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které začaly pronikat i do obecné problematiky vodivých polymerů. Hlavní nevýhodou polyacetyleny je jeho velká nestabilita při vystavení okolním podmínkám [21]. Proto se výzkum vodivých polymerů přesunul spíše na více stabilní zástupce této třídy materiálů, polyanilin (PANI) a polypyrrol (PPy), které jsou spolu s polyacetylenem nejvíce studované vodivé polymery. [15]



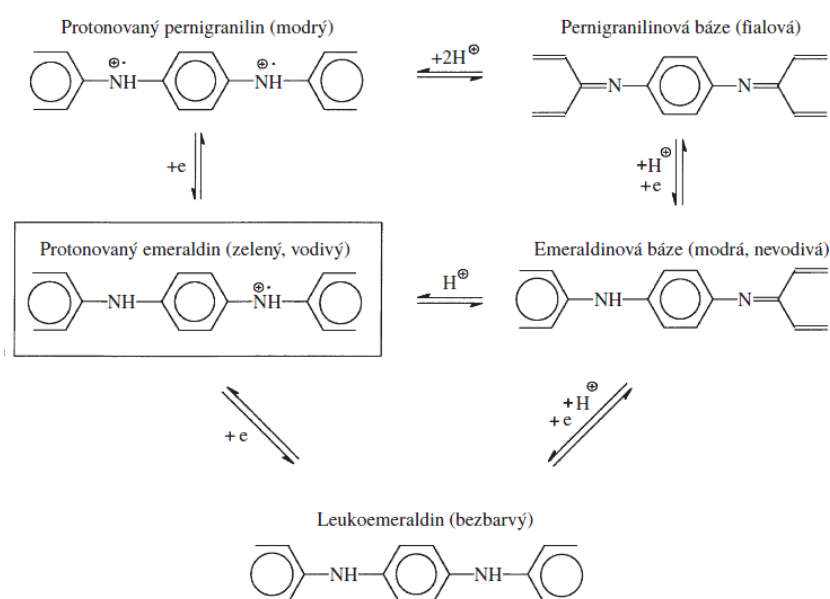
Obr. 2.3 – Zástupci vodivých konjugovaných polymerů. [15]

Dalšími zástupci polymerů s intrinzní vodivostí jsou například polythiofen (PT), poly(p-fenylen) (PPP), poly(p-fenylenvinyle) (PPV) a poly(3,4-ethylendiothiofen) (PEDOT). [15]

2.2.1 Polyanilin

Jako chemická látka je anilin známý již více jak 150 let, první podrobnější zdokumentování provedl roku 1840 Fritzsche, a název pochází ze španělského výrazu añil, který v překladu znamená indigo, při jehož destilaci poprvé anilin vznikl [15]. Velkého zájmu vědců po celém světě se ale dočkal až po poměrně nedávném objevu vysoké vodivosti a dalších speciálních vlastností, jako jsou elektrochemická redoxní aktivita, možnost reverzního dopování/dedopování a elektrochromismus (barevná změna způsobená redoxním procesem). [22]

Polyanilin patří k nejslibnějším polymerům s vlastní vodivostí a v této práci jsem ho použil pro přípravu kompozitů s epoxidovou matricí. V třídě konjugovaných polymerů sice nedosahuje nejvyšších vodivostí, ale pořád je na velmi přijatelné úrovni, s potenciální využitelností od antistatických ochranných vrstev, až po elektronické součástky. Mezi přednosti polyanilinu patří také vysoký polymerizační výnos, dobrá environmentální stabilita a relativně nízká cena. [9] Oxidací či protonací polyanilinu vzniká řada jeho různých forem, lišících se chemickou strukturou, zbarvením, stabilitou a vodivostí. Tyto jednotlivé formy jsou na obr. 2.4. Asi nepoužívanější vodivá forma je emeraldinová sůl, vznikající protonací



Obr. 2.4 – Formy polyanilinu [15]

z nevodivé emeraldinové báze. Při dopování emeraldinové báze kyselinou, zůstává v řetězci polymeru stejný počet nosičů náboje, ale mění se jejich rozložení. To způsobí i změnu zbarvení modré báze na smaragdově zelenou sůl, podle čehož také vznikl název emeraldin (z angl. emerald = smaragd). [15]

2.3 Oblasti využití vodivých polymerů

Přelomový objev nové třídy materiálů vodivých polymerů zaujal fyziky a chemiky po celém světě, a stále je zde mnoho nevyřešených otázek a problémů, které si zaslouží další výzkum. "Plastová" elektronika přináší mnoho nových možností, nanášení vrstev polymerů je poměrně levné a rychlé a proto jsou tyto materiály perspektivní pro hromadnou sériovou výrobu. Polymery mají malou hustotu a jsou tedy lehčí než klasické vodiče, elektrické součástky zhotovené z organických materiálů jsou mnohdy také odolné vůči mechanickému ohybu a jsou tedy vhodné pro aplikace, jako je například elektronika v oblečení. Plastová elektrotechnika by ovšem v budoucnu tu klasickou neměla nahradit. Její vize je s ní spíše v komplementárním než kompetitivním vztahu. [15]

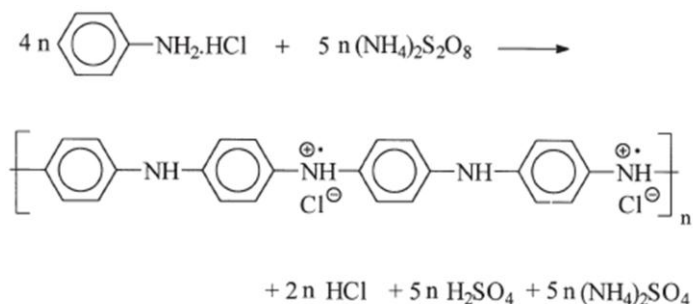
Oblasti využití vodivých polymerů se dají rozdělit na dvě skupiny. První skupina využívá chemické reaktivity konjugovaného vazebního systému, která způsobuje změny elektrických a optických vlastností těchto materiálů, a patří do ní například chemické a tepelné senzory, elektrické displeje nebo baterie. Druhá skupina je založena přímo na elektrické vodivosti a patří do ní aplikace jako elektrostatické materiály, elektromagnetické stínění, vodivá pojiva či aktivní elektronické součástky jako jsou tranzistory nebo diody. [18]

3 Příprava vzorků kompozitů

Tato kapitola pojednává o přípravě vzorků kompozitů epoxidové pryskyřice plněné dvěma typy polyanilinu s různou vodivostí. První typ polyanilinu byl dopovaný 1M kyselinou sírovou (H_2SO_4) a druhý 1M kyselinou octovou (CH_3COOH). Naměřené vodivosti slisovaných pelet těchto typů polyanilinu byly $0,068 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro PANI- H_2SO_4 a $0,038 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro PANI- CH_3COOH . Jako materiál pro matrici byly použity dva typy epoxidových pryskyřic, LETOXIT PR 102 a LETOXIT PR 108. Druhý typ byl použit proto, že při přípravě vzorků s první pryskyřicí docházelo ke snížení vodivosti plniva. Pro oba typy polyanilinu jsem připravil vzorky s 1%, 3%, 5%, 7% a 10% hmotnostní koncentrací PANI. Dále jsou podrobněji popsány všechny použité postupy.

3.1 Syntéza polyanilinu

Polyanilin byl připraven syntézou podle ref. 15 (Stejskal a spol.), oxidační polymerací anilin hydrochloridu peroxydvojsíranem amonným v kyselém vodném prostředí. Na výrobu cca. 11 g polyanilinu bylo třeba 12,95 g (0,1 mol) anilin hydrochloridu ($\text{C}_6\text{H}_7\text{N}\cdot\text{HCl}$), rozpuštěného a důkladně rozmíchaného v 250 ml H_2O po dobu 5 minut. Dále bylo odděleně rozpuštěno 28,55 g (0,1 mol) peroxydvojsíranu amonného ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) v 250 ml H_2O , a také důkladně mícháno po dobu 5 minut. Oba roztoky byly poté slity a míchány po dobu 20 minut, anilin reagoval ihned po slítí a roztok okamžitě lehce zmodral, po několika minutách ztmavěl s nádechem tmavě zelené barvy. Tento proces je znázorněn na obr. 3.1. Hotový polyanilin byl poté z roztoku oddělen filtrací, pro urychlení procesu probíhající pod sníženým tlakem.



Obrázek 3.1 - Oxidace anilinu peroxydvojsíranem amonným. [12]

Při tomto způsobu polymerace anilin hydrochloridu vzniká polyanilin hydrochlorid, tedy vodivá nazelenalá emeraldinová sůl. Poté byl polyanilin ještě propláchnutý acetonem, pro odstranění nezpolymerizovaného monomeru a zbytků použitých chemikálií. Jelikož je proces dopování polyanilinu touto cestou velmi neurčitý, byl ještě před vysušením propláchnutý 1M roztokem amoniaku (500 ml na várku). Amoniak způsobil dedopování polyanilinu, díky čemuž vznikla nevodivá namodralá emeraldinová báze. Poté byl polyanilin sušen po dobu 24 hodin při 50°C a za sníženého tlaku (0,1 bar). Výtěžek z polymerace měl být teoreticky téměř stoprocentní, byl ale nižší než

předpokládaný, a to pouze okolo 85%. To mohlo být způsobeno hlavně ztrátami při filtraci. Na obr. 3.2 jsou ukázky použitých chemikálií a vzniklých forem polyanilinů. Polyanilinový prášek je velice tmavý, a v praxi je při slabším osvětlení velmi obtížné rozlišit již dopovaný tmavě zelený polyanilin od tmavě modré nevodivé báze.



Obrázek 3.2 – a) peroxydvojsíran amonný, b) anilin hydrochlorid, c) PANI emeraldinová báze, d) PANI vodivá emeraldinová sůl

3.1.1 Dopování polyanilinu

Po vysušení byla emeraldinová báze dopována kyselinou sírovou a kyselinou octovou. Pro účely dopování nebyly použity koncentrované kyseliny, ale vždy byl namíchán pouze 1M vodný roztok příslušné kyseliny. Dopování probíhalo smícháním nevodivé báze polyanilinu s příslušnou 1M kyselinou (500 ml kyseliny na 7g PANI), promícháním po dobu 10 minut, a vložením do ultrazvuku pro lepší dezintegraci polyanilinu na dobu jedné hodiny. Po vyndání z ultrazvuku byla disperze polyanilinu v kyselině přefiltrována opět za sníženého tlaku a poté důkladně propláchnuta destilovanou vodou. Přefiltrovaný dopovaný polyanilin byl dále vysušen v peci, a nakonec nadrcen na jemný prášek pomocí třecí porcelánové misky a sítka. Výtěžnost z dopování byla téměř 100%. Z obou dopovaných forem polyanilinu byly pod tlakem 15 kN slisovány pelety a změřena jejich vodivost. Čistý PANI-H₂SO₄ měl vodivost 0,068 S·cm⁻¹ a PANI-CH₃COOH měl vodivost 0,038 S·cm⁻¹.

3.2 Výroba kompozitů

Pro kompozity musely být použity dva typy pryskyřicových matic, jelikož se první várka vzorků příliš nepovedla. Použitá epoxidová pryskyřice měla zásadité tvrdidlo, které mělo za následek dedopování vodivého plniva. Proto jsem musel použít jinou pryskyřici s anhydridickým tvrdidlem, jejíž nevýhodou ale byla teplota vytvrzování 150 °C. Pro měření elektrických vlastností nebyly vzorky s prvním typem epoxidové matrice příliš vhodné, proto

se ve čtvrté kapitole objevují pouze pro srovnání ve vodivostních charakteristikách kompozitů. Dále je popsána příprava kompozitů s oběma typy matric.

3.2.1 Epoxidová matrice LETOXIT PR 102

Pro přípravu prvních vzorků kompozitů jsem použil pryskyřici LETOXIT PR 102, vyrobenou na bázi modifikované epoxidové pryskyřice dianového typu. K vytvrzení této pryskyřice dochází za pokojové teploty smícháním s tvrdidlem LETOXIT EM 402. Pryskyřice byla dodána brněnskou firmou 5M, s.r.o. Rozměry vzorků jsem zvolil s ohledem



Obrázek 3.3 – Forma na vzorky.

na elektrodové systémy, které jsem měl k dispozici. Jedná se o kulaté vzorky s tloušťkou přibližně 1 mm a průměrem 65 mm. Na každý vzorek jsem použil 5 g pryskyřice s tvrdidlem a příslušné hm.% polyanilinu, ručně přimíchané do směsi. Pro každou koncentraci příslušného PANI jsem dělal tři vzorky. Vytvrzení probíhalo ve speciálních formách vyrobených z teflonu a plechu (obr. 3.3). Na laminátovou desku byla přilepena teflonová fólie, na kterou byla, pomocí plastového lepidla a tavné pistole, přichycena forma z tenkého proužku plechu.

První sada se nepovedla, protože došlo k agregaci PANI v ultrazvuku a k dedopování vlivem aminického tvrdidla. U všech vzorků s PANI- H_2SO_4 došlo k úplnému zmodrání polyanilinu, u vzorků s PANI- CH_3COOH nebyl efekt dedopování tak značný, jelikož se jedná o slabší kyselinu. Na obr. 3.4b je srovnání obou typů PANI v kompozitu. Pro dosažení lepších výsledků bylo nutné připravit vzorky s jinou pryskyřicí.



a

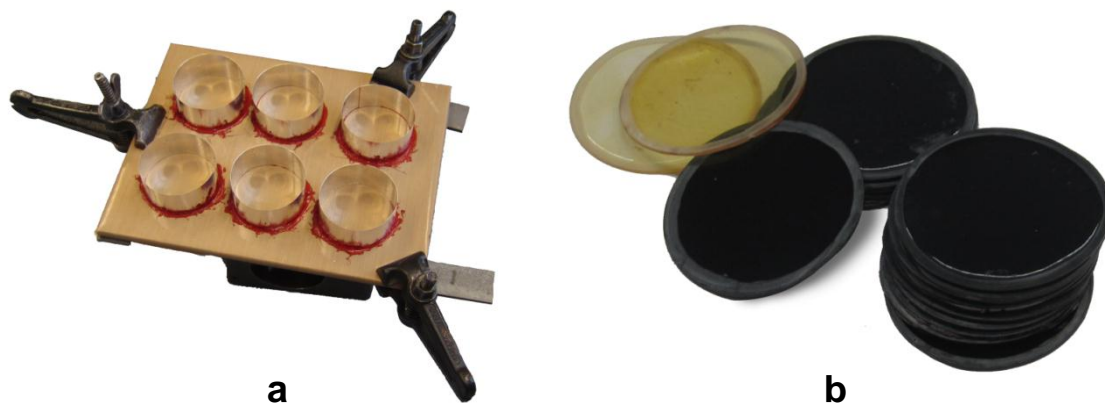
Obr. 3.4

b

- a) Vzorky kompozitů plněné polyanilinem dopovaným kyselinou octovou.
 b) Podsvícené vzorky s 1% hm.% PANI, zleva PANI- CH_3COOH a PANI- H_2SO_4 , modré zbarvení je způsobeno dedopováním polyanilinového plniva vlivem tvrdidla.

3.2.2 Epoxidová matrice LETOXIT PR 108

Pro přípravu dalších vzorků jsem použil epoxidovou pryskyřici LETOXIT PR 108 a tvrdidlo LETOXIT EM 214, také od výrobce 5M s.r.o. Jedná se o kyselé tvrdidlo na bázi anhydridu kyseliny, takže již nedocházelo k dedopování polyanilinu. Vytvrzování této pryskyřice probíhá při teplotě 150 °C po dobu dvou hodin. Forma pro vytvrzování byla tedy k podložce přichycena pomocí motorového silikonu, který odolává teplotám až do 300 °C. Aby nedocházelo ke zkroucení podložky vlivem tepelné roztažnosti, byla jako podložka použita kompozitní teflonová fólie s výztuží ze skelných vláken, natažená na kovové desce a napnutá pomocí šroubovacích svorek (obr. 3.5a). Pro každou koncentraci příslušného PANI jsem dělal dva vzorky. Průměr vzorků byl zachován 65 mm a tloušťka těchto vzorků byla přibližně 1,6 mm. Na každý vzorek jsem použil 7,5g pryskyřice s tvrdidlem a příslušné hm.% polyanilinu, ručně přimíchané do směsi. Před vytvrzením byla směs umístěna do ultrazvuku na dobu 20 minut, aby došlo ke zjemnění disperze PANI. Poté byla směs umístěna ještě do vakua na dobu 20 minut pro odstranění vzduchových bublin vzniklých mícháním. Po vytvrzení bylo nutné všem vzorkům zabrousit zvýšené okraje, vzniklé adhezí materiálu ke stěnám formy. Hotové vzorky jsou na obrázku 3.5b.



Obr. 3.5

a) Forma pro tepelné vytvrzení vzorků.

b) Hotové vzorky s matricí z pryskyřice LETOXIT PR 108.

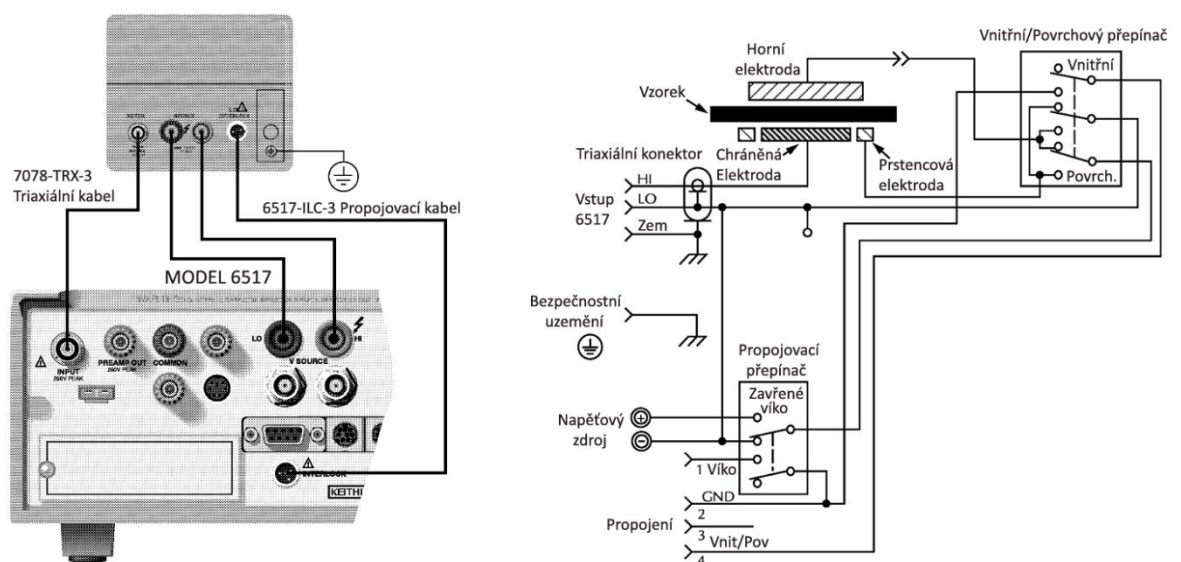
4 Elektrické vlastnosti kompozitů

U připravených vzorků kompozitů byly změřeny elektrické vlastnosti. Jedná se o vybrané stejnosměrné a frekvenční charakteristiky. První část této kapitoly popisuje použité měřicí metody a přístroje, v druhé části jsou pak popsány výsledky z těchto měření.

4.1 Použité měřicí metody

4.1.1 Stejnosměrná měření

K měření voltampérových a vodivostních charakteristik byl použit elektrometr KEITHLEY 6517A. Jedná se o velmi přesný měřicí přístroj vhodný pro měření vysokých odporů, který zároveň slouží i jako vysokonapěťový zdroj. Měřené vzorky byly upnuty v elektrodovém systému KEITHLEY 8009, v zapojení pro měření vnitřní rezistivity. Na obr. 4.1 je znázorněno vnitřní schéma elektrodového systému a jeho připojení k elektrometru. Na tloušťku vzorku bylo aplikováno napětí v rozsahu od -500 V do +500 V, a po ustálení (cca. 1 minuta) byl odečten protékající proud. Z naměřených hodnot byly sestaveny V-A charakteristiky a pro každý vzorek byla spočtena měrná elektrická vodivost při napětí 500 V.

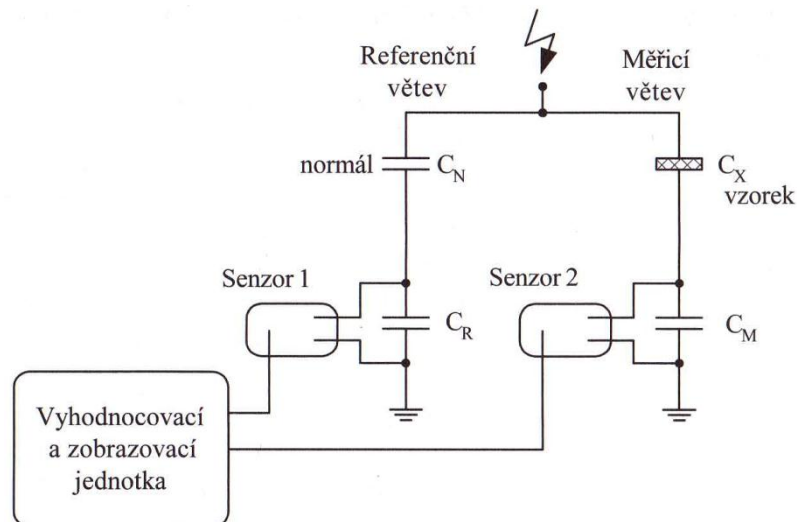


Obr. 4.1 – Propojení měřicího a elektrodového systému a vnitřní schéma elektrodového systému. [23]

4.1.2 Teplotní závislosti ztrátového činitele a permitivity

Teplotní závislosti ztrátového činitele a permitivity vzorků byly měřeny pomocí automatického můstku pro měření dielektrických ztrát. K tomu byl použit systém pro měření dielektrických ztrát LDV-5 od firmy Lemke Diagnostics. Jako zdroj napětí byl použit vysokonapěťový zdroj SIMATIC SM4 s operátorským rozhraním OP17 od firmy Siemens. Vzorky byly upnuty v tříelektrodovém systému pro měření pevných izolantů TETTEX 2914, s nastavitelnou teplotou pomocí teplotní ovládací jednotky TETTEX TCU, s dvěma nezávislými teplotními regulátory pro horní i spodní elektrodu. Měření probíhalo při frekvenci 50 Hz a napětí 250 V. Vzorky byly upnuty v měřicích elektrodách pod tlakem $10 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$ a změřeny při teplotách 35, 45, 55, 75, 95 a 115 °C. Hodnoty byly odečteny vždy až po prohřátí vzorku a ustálení.

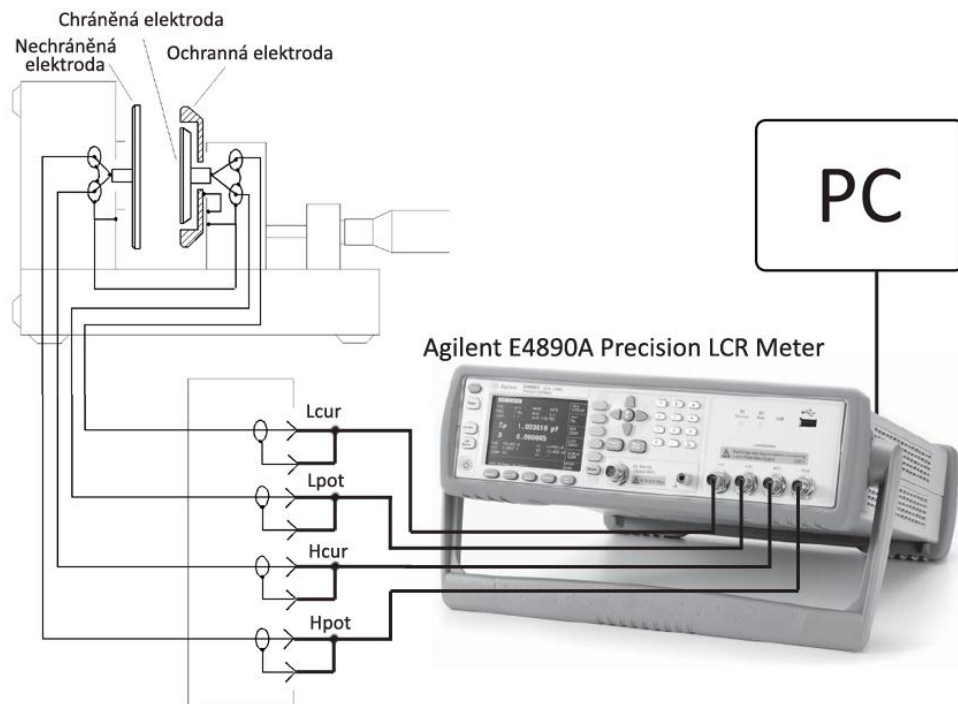
Schéma měření pomocí automatického můstku je znázorněno na obr. 4.2. Můstek se skládá z dvou větví, které představují kapacitní děliče s vysokonapěťovými kapacitami (C_X a C_N) a nízkonapěťovými kapacitami (C_R a C_M). Pomocí senzorů 1 a 2 jsou měřena a digitalizována napětí na nízkonapěťových kondenzátorech, a poté přenášena pomocí optických kabelů do počítače, který je zpracovává pomocí rychlé Fourierovy transformace. Z fázového úhlu mezi těmito napětími je určen ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. Kapacita vzorku C_X je určena z dělicího poměru měřicí větve. [24]



Obr. 4.2 – Schéma automatického můstku pro měření dielektrických ztrát. [24]

4.1.3 Frekvenční charakteristiky

Pro měření frekvenčních charakteristik byl použit automatický měřicí můstek Agilent E4980A Precision LCR Meter. Byla použita metoda měření pomocí kontaktních chráněných elektrod, připojených k přístroji podle schématu na obr. 4.3. Měřicí přístroj byl připojen k počítači a ovládaný pomocí aplikace MS Excel, kam se také automaticky ukládala měřená data. U každého vzorku byly nejprve proměřeny parametry v režimu Cp-D (paralelní kapacita a ztrátový činitel) a poté Z- θ d (impedance a fázový úhel ve stupních). Měření probíhalo při napětí 1 V, vždy pro 60 hodnot frekvencí v rozsahu od 20 Hz do 2 MHz. Z naměřených hodnot byla také vypočtena frekvenční závislost permitivity.



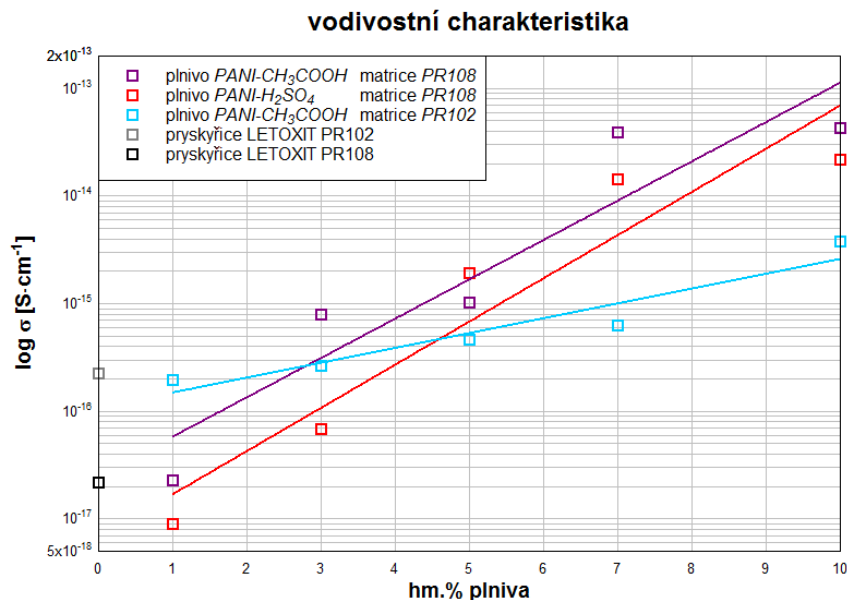
Obr. 4.3 - Schéma připojení elektrodevého systému k měřicímu přístroji Agilent. [25]

4.2 Výsledky a diskuze k měření

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření elektrických vlastností kompozitů a diskuze k nim. V první části jsou popsány stejnosměrné vodivostní a volt-ampérové charakteristiky. Dále je zde několik druhů střídavých charakteristik. Elektrické vlastnosti byly měřeny pro vzorky s epoxidovou anhydridickou matricí LETOXIT PR 108, pouze u vodivostních charakteristik je i srovnání s některými vzorky s dedopovaným PANI.

4.2.1 Stejnosměrné charakteristiky

Z měření volt-ampérových charakteristik byla spočtena měrná elektrická vodivost vzorků pro jednotlivé typy a koncentrace plniva, tyto hodnoty byly spočteny při napětí 500 V. Pro srovnání byla změřena i vodivost kompozitů s pryskyřicí LETOXIT PR 102 s aminickým tvrdidlem způsobujícím dedopování PANI. Na obr. 4.4 je znázorněna závislost vnitřní vodivosti vzorků na koncentraci plniva. Konduktivita vzorků dosahovala velmi malých hodnot a ani zdaleka se nepřibližovala konduktivitě samotného plniva ($0,068 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro PANI- H_2SO_4 a $0,038 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro PANI- CH_3COOH), z toho lze usoudit, že nebylo dosaženo perkolačního prahu.

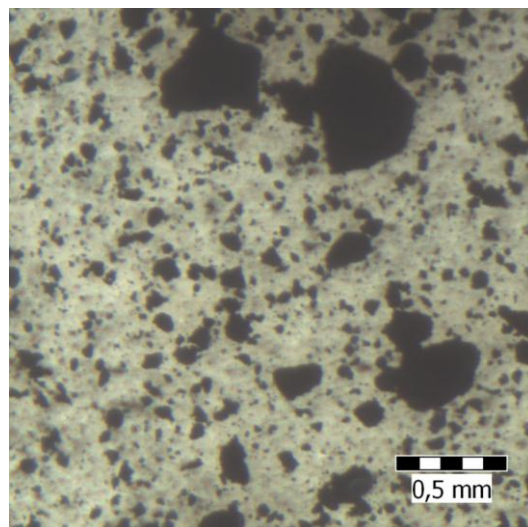


Obr. 4.4 – Vodivostní charakteristiky vzorků kompozitů.

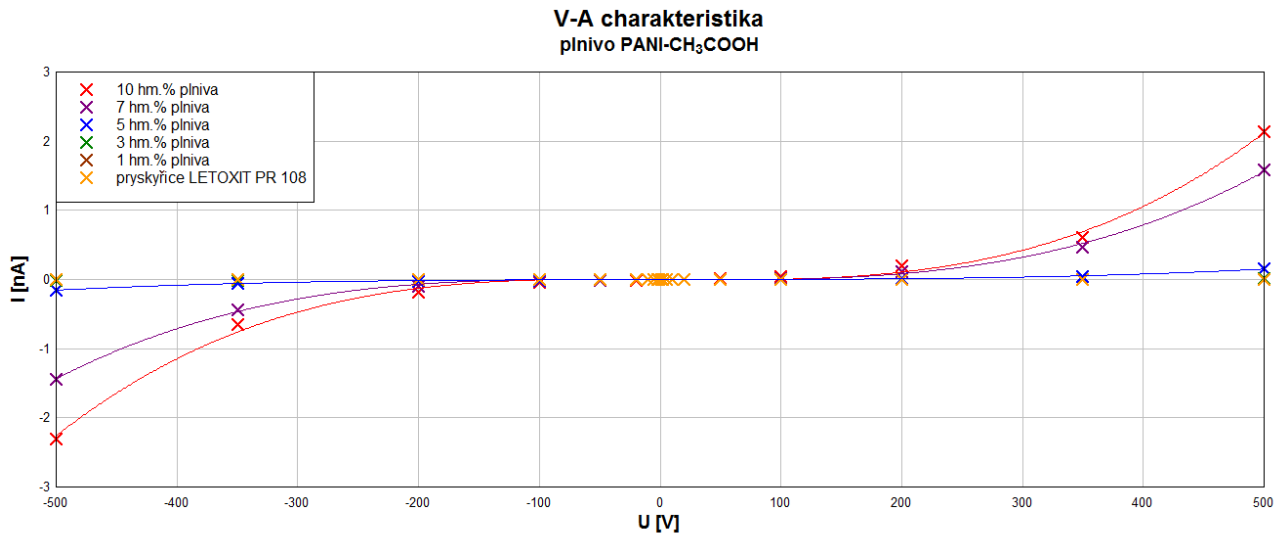
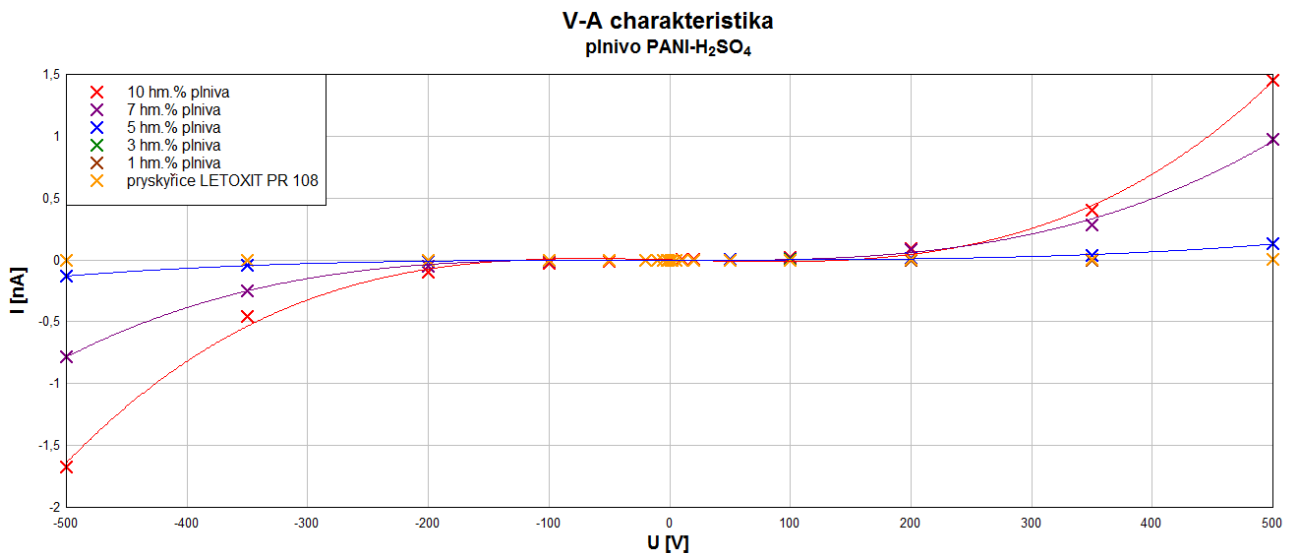
Nízká vodivost vzorků mohla být zapříčiněna hlavně špatnou disperzí PANI v matrici. Na obr. 4.5 je vidět disperze částic plniva ve vzorku s 1hm.% PANI- H_2SO_4 , největší shluky PANI dosahují průměru až okolo 0,5 mm.

Podobných výsledků dosáhli také W. Jia a kolektiv při přípravě kompozitů anhydridické epoxidové matrice plněné PANI-DBSA (polyanilin dopovaný dodecylbenzensírovou kyselinou). Při ručním vmíchání práškového PANI dosáhli perkolačního prahu až po přidání 40 hm.% plniva [9]. P. Tsotra dosáhl u epoxidových kompozitů plněných také PANI-DBSA perkolačního prahu již při koncentraci 2,5 hm.%. Dobrá disperze PANI v kompozitu byla dosažena rozmícháním PANI v toluenu a vložením do ultrazvuku, tato disperze byla poté smíchána s epoxidovou matricí a všechno toluen byl ve vakuu z kompozitu odpařen [26]. Podobně dobrých výsledků dosáhl také Q. Yang, který dosáhl epoxidových kompozitů plněných PANI s konduktivitou $3 \cdot 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ již se 7,5 hm.% plniva. Před přimícháním do kompozitu byl PANI rozmíchán v xylynu a disperze vložena do ultrazvuku na dobu 2 hodin [27]. Disperze polyanilinu v matrici má tedy značný vliv na konečnou vodivost kompozitu. Příprava polyanilinu ani kompozitů navíc neprobíhala v přesně definovaných laboratorních podmínkách a čistotě, to mohlo mít také mírný vliv na snížení celkové vodivosti vzorků.

Na obr. 4.6 a 4.7 jsou znázorněny volt-ampérové charakteristiky pro jednotlivé typy polyanilinu a jejich koncentrace. Jelikož je vodivost vzorků velmi malá, musely být před měřením vyzkratovány, ale i tak měření ovlivnily malé parazitní proudy v řádech pA. Rozsah napětí byl od -500 V do 500 V, nárůst proudů odpovídá teoretickým předpokladům a má nelineární průběh. Z charakteristik byl vyřazen jeden vzorek s 10 hm.% PANI-H₂SO₄, jenž se od ostatních vzorků se stejným obsahem plniva značně lišil, při napětí 500 V jím protékal proud 74 nA, to mohlo být způsobeno vadou vzorku či náhodným propojením vodivé cesty vzhledem k malé tloušťce vzorků. Jelikož jsou objemy plniva u všech vzorků pod perkolačním prahem, největší proudy byly naměřeny v řádech nA. V příloze na str. I - III jsou zdrojové hodnoty pro sestavené grafy.



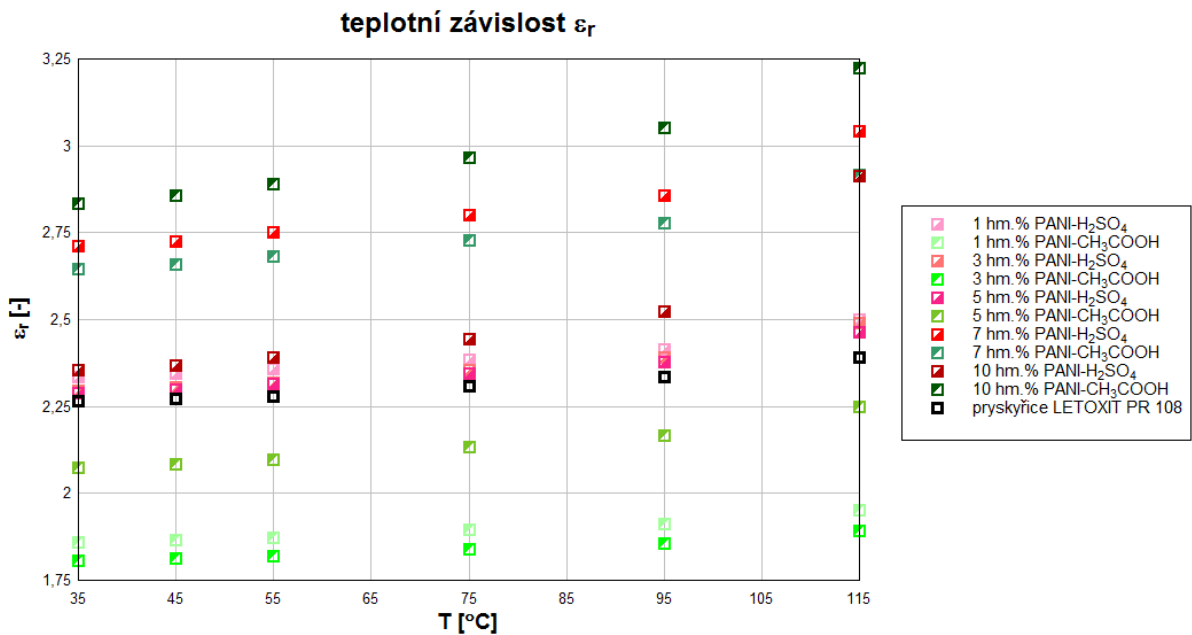
Obr. 4.5 – Rozložení částic plniva ve vzorku s 1 hm.% PANI-H₂SO₄

Obr. 4.6 – V-A charakteristiky vzorků s plnivem PANI-CH₃COOH.Obr. 4.7 – V-A charakteristiky vzorků s plnivem PANI-H₂SO₄.

4.2.2 Teplotní závislost permitivity a ztrátového činitele

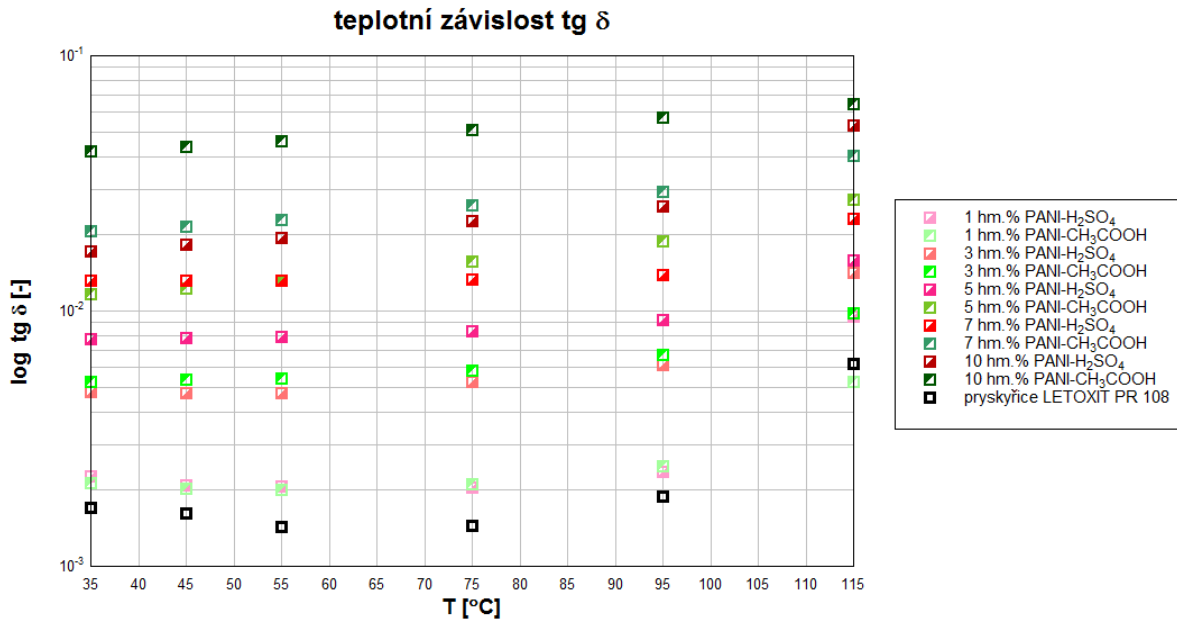
Vzhledem k malé vodivosti kompozitů jsou dielektrické vlastnosti pryskyřice, použité pro matici, ovlivněny těmito koncentracemi plniva pouze nepatrně. Na obr. 4.8 je závislost relativní permitivity ϵ_r na teplotě a také koncentraci jednotlivých typů plniv. Relativní permitivita vyjadřuje poměr mezi permitivitou daného dielektrika a vakua. Je jednou z nejvýznamnějších veličin pro klasifikaci chování dielektrik a vyjadřuje schopnost polarizace dielektrika. Čím je její hodnota vyšší, tím je větší hodnota kapacity kondenzátoru s daným dielektrikem. Při zahřívání materiálu se vlivem dodávané tepelné energie zvětšuje jeho elektrická i tepelná vodivost, a tím pádem se zvětšuje i jeho permitivita. Se stále se zvyšující

teplotou je díky tomu tento nárůst nelineární, naměřené hodnoty tedy odpovídají teoretickým předpokladům [24]. S rostoucí teplotou by se měly hodnoty permitivity teoreticky ještě zvyšovat, vzhledem k tloušťce materiálu a velikosti napětí by ale při dalším zvyšování teploty mohlo dojít k průrazu vzorku. Permitivita roste také se zvětšující se vodivostí a tedy s rostoucím obsahem plniva. Vzhledem k tomu, že koncentrace nedosahují perkolačního prahu a rozložení plniva ve vzorcích je nehomogenní, naměřené hodnoty tomu přesně neodpovídají. Z naměřených hodnot je také patrné, že takto malé koncentrace plniva ovlivňují permitivitu samotné pryskyřice jen nepatrně.



Obr. 4.8 – Závislost relativní permitivity na teplotě (hodnoty viz. str. IV).

Na obr. 4.9 je dále vyobrazena závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ na teplotě a také na koncentraci plniv. Ztrátový činitel vyjadřuje poměr imaginární a reálné složky permitivity, a charakterizuje tedy dielektrické ztráty vzniklé namáháním dielektrika střídavým polem. Ztrátový činitel je tedy spjatý s permitivitou a jeho nelineární nárůst také odpovídá teoretickým předpokladům. Při porovnání ztrátového činitele v závislosti na koncentraci plniva, můžeme jasně vidět jeho nárůst s rostoucím množstvím polyanilinu. V praxi se může hodnota $\text{tg } \delta$ použít k rychlému posouzení kvality izolantů z hlediska ztrát. Za dobrý izolant můžeme považovat materiály s $\text{tg } \delta$ menším než 10^{-3} , což je přibližně hodnota naměřená pro samotnou pryskyřici, naopak $\text{tg } \delta$ větší než 10^{-2} je z elektroizolačního hlediska špatný [24]. Je tedy patrné, že i velmi malé koncentrace značně zhoršují elektroizolační vlastnosti.

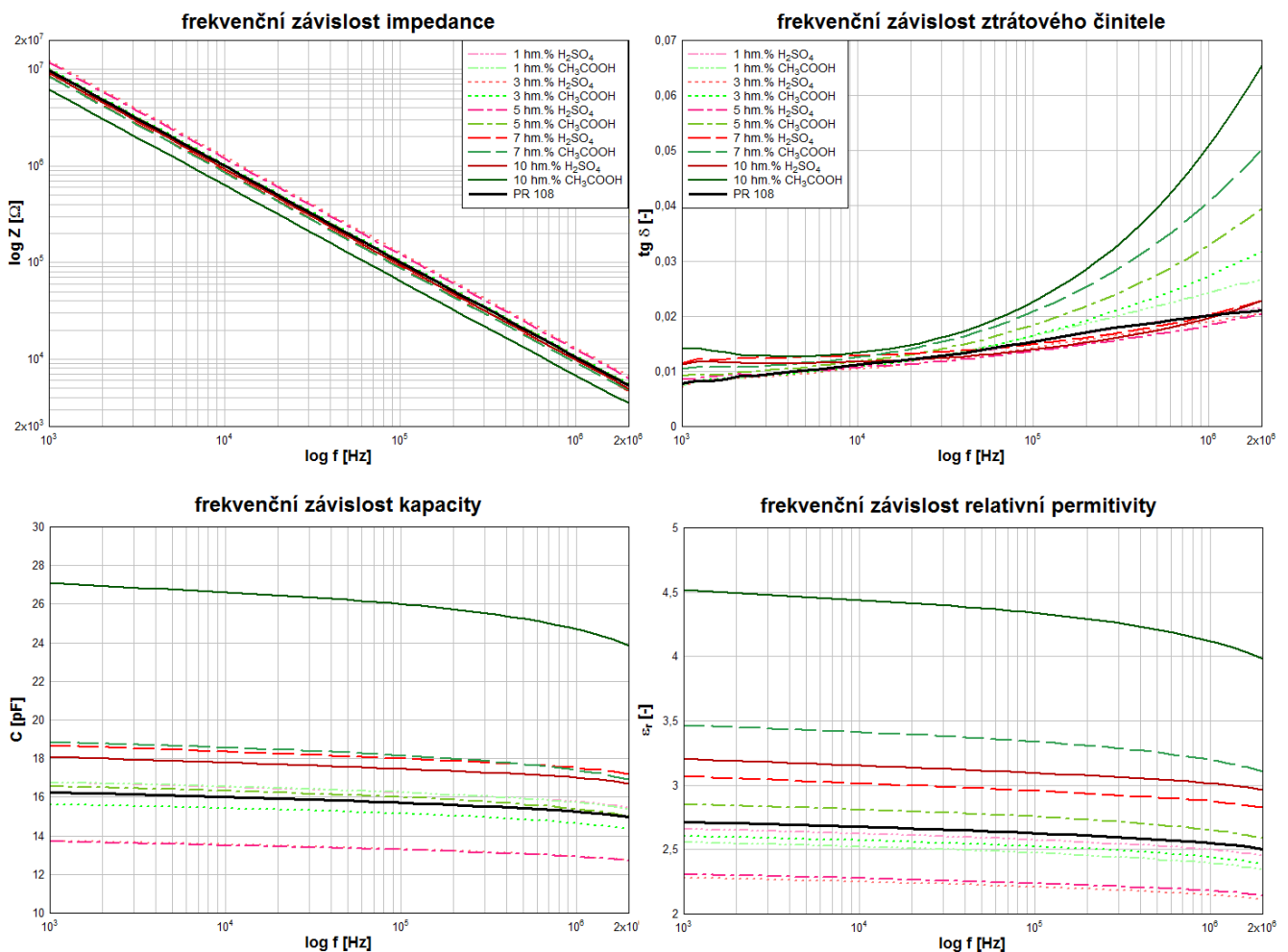


Obr. 4.9 – Závislost ztrátového činitele na teplotě (hodnoty viz. str. III).

4.2.3 Frekvenční charakteristiky

Frekvenční charakteristiky byly měřeny v rozsahu od 20 Hz do 2 MHz, jelikož to byl maximální rozsah měřicího můstku Agilent. Vzhledem k tomu, že izolace elektrod má podobný odpor jako samotné vzorky, při nízkých frekvencích do 1 kHz byly naměřeny zkreslené hodnoty. Na obr. 4.10 jsou znázorněny frekvenční charakteristiky impedance, ztrátového činitele, kapacity a relativní permitivity. Charakteristiky vystihují závislosti v rozsahu frekvencí od 1 kHz do 2 MHz. Vzhledem k celkové nízké vodivosti se pryskyřice a většina vzorků mezi elektrodami chovají podobně jako náhradní paralelní obvod kondenzátoru s ideálním dielektrikem a ohmickým odporem. Z frekvenční závislosti impedance je patrné, že s rostoucí frekvencí klesá impedance asi o 20 dB/dek, což odpovídá chování kondenzátoru. Z grafu je také patrná velikost impedance v závislosti na koncentraci plniva. Teoretický předpoklad je, že vzorky s vyššími koncentracemi vodivého plniva mají menší impedanci. Rozložení plniva v matrici je ale velice nehomogenní a navíc se nejedná o vztažnou hodnotu, přičemž vzorky mají rozdílné tloušťky. Tento předpoklad tedy neplatí pro všechny vzorky. Z frekvenční charakteristiky ztrátového činitele je vidět nelineární závislost tg δ na frekvenci. Čím více vodivého plniva vzorek obsahuje, tím je nárůst tg δ strmější. To odpovídá teoretickým předpokladům, jelikož vlivem nehomogenity dielektrika způsobené vodivými oblastmi polyanilinu dochází k migrační polarizaci, a tím pádem ke zvýšení ztrát. Ztrátový činitel by měl vzrůstat jen do té doby, než dipólové molekuly přestanou sledovat

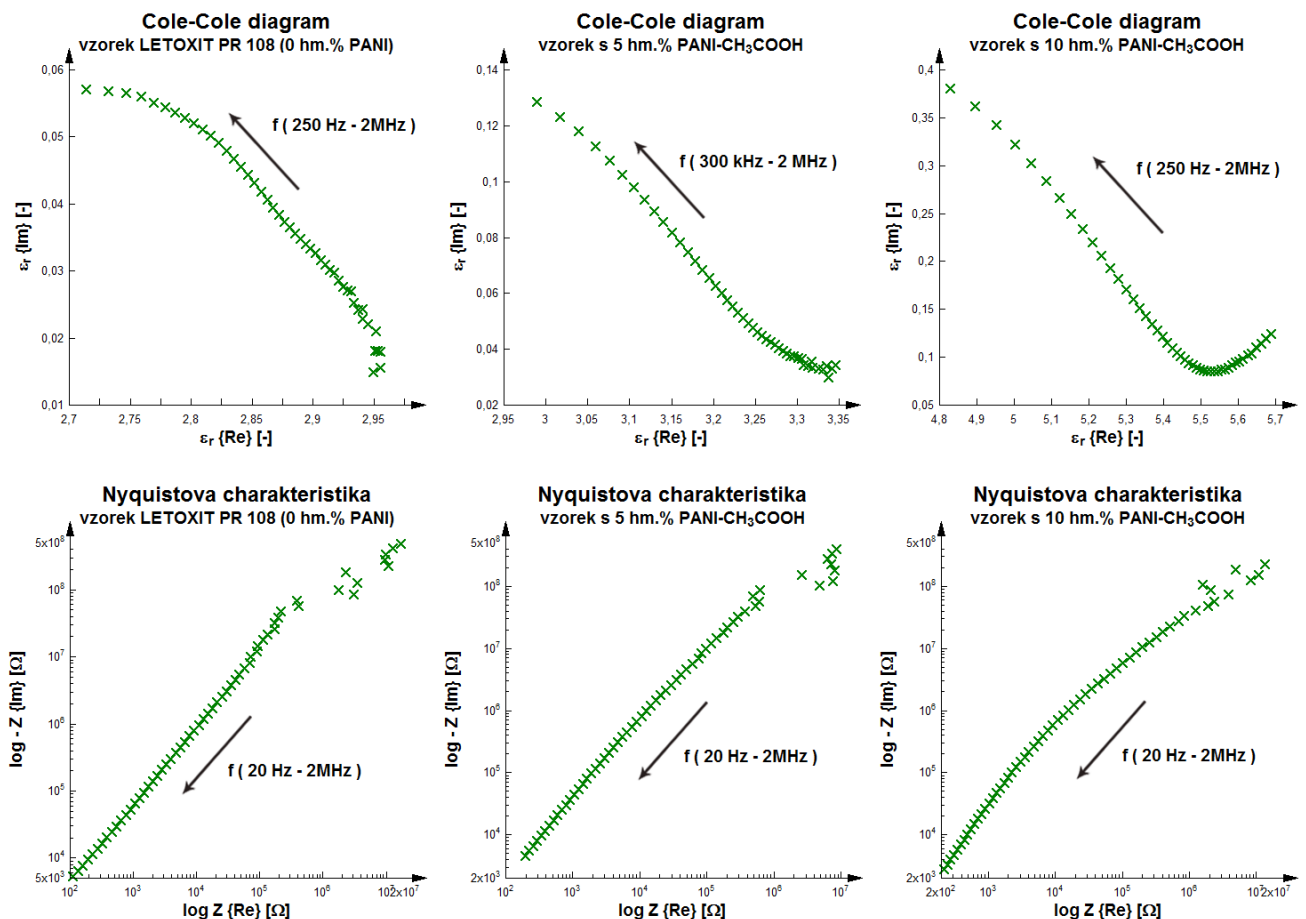
změny frekvence, poté by mělo dojít k ustálení ztrátového výkonu a k poklesu ztrátového činitele [24]. Vyšší a nižší frekvence jsem ale bohužel nemohl změřit, protože jsem neměl k dispozici vhodné měřicí přístroje. Frekvenční závislosti kapacity a relativní permitivity jsou si velmi podobné, jelikož spolu také přímo souvisí. Průběhy těchto charakteristik s frekvencí postupně klesají a od frekvence 100 kHz je tento pokles prudší, to odpovídá teoretickým předpokladům chování dielektrika ve střídavém poli. Vzhledem k omezenému frekvenčnímu rozsahu není z grafů patrné jak bude průběh pokračovat při vyšších frekvencích, z toho by mohlo být například poznat, ke kolika druhům polarizace v materiálu dochází. Zdrojové hodnoty pro grafy jsou v příloze na str. V - IX.



Obr. 4.10 – Frekvenční závislosti impedance, ztrátového činitele, kapacity a relativní permitivity

- Nyquistovy a Cole-Cole diagramy

Z naměřených frekvenčních závislostí jsem sestavil také Nyquistovy a Cole-Cole diagramy. Nyquistův diagram je klasický nástroj k vyšetřování komplexních impedancí znázorňující závislost imaginární a reálné části impedance na frekvenci, s jeho pomocí pak lze sestavit náhradní obvod vyjadřující frekvenční chování materiálu. Cole-Cole diagramy zase slouží k popsání komplexní permitivity a znázorňují závislosti imaginární a reálné složky permitivity na frekvenci. Slouží hlavně pro určení druhů polarizací probíhajících v materiálu [24]. Vzhledem k omezenému frekvenčnímu rozsahu, bylo možné zobrazit jenom část těchto průběhů a není zřejmé, kolik relaxačních dob diagram obsahuje. Na obr. 4.11 jsou ukázky těchto diagramů pro 10%, 5% a 0% obsah plniva. Tyto průběhy odpovídají teoretickým předpokladům, ale vzhledem k omezenému úseku frekvencí nemají valnou vypovídací hodnotu.



Obr. 4.11 – Nyquistovy a Cole-Cole diagramy, ukázka pro vybrané koncentrace plniva a čistou pryskyřici.

Z diagramů je ale patrné, že čím je větší obsah plniva ve vzorku, tím je menší zkreslení při nízkých frekvencích, to je nejspíš způsobeno větší vodivostí vzorků. U Cole-Cole diagramů vzorků s většími obsahy plniva se při nižších frekvencích průběh mírně zvedá, to nasvědčuje tomu, že by v oboru nízkých frekvencí mohlo být lokální maximum značící migrační polarizaci způsobenou právě vodivým polyanilinem, který je obsažen v kompozitu. Tuto hypotézu potvrzuje i zvýšení ztrátového činitele v závislosti na koncentraci plniva (viz obr. 4.8 a 4.9). V příloze na str. X-XIV jsou naměřené a vypočtené hodnoty a příklady postupu pro sestavení Nyquistových a Cole-Cole diagramů.

5 Závěr

Kompozitní materiály nezpochybnitelně přináší obrovský potenciál do oblasti vývoje nových tříd materiálů, které často nahrazují v praxi běžně používané materiály. První část práce se věnovala hlavně problematice kompozitů s polymerními matricemi, jejichž výhodou je malá hustota a dobrá stabilita. Jedná se tedy o velmi lehké materiály, které v kombinaci s funkčními plnivy mohou svými mechanickými či fyzikálními vlastnostmi nahradit nebo dokonce předčít materiály používané v dané oblasti. Příkladem může být automobilový průmysl, ve kterém již řadu let stále lepší kompozity nahrazují klasické kovy používané pro výrobu karoserií. Tato práce byla zaměřena hlavně na problematiku kompozitních materiálů s plnivy na bázi vodivých polymerů a jejich elektrické vlastnosti. Proto rešeršní část obsahovala také uvedení do problematiky samotných polymerů s vlastní vodivostí. Tyto kompozity v sobě pak kombinují vhodné vlastnosti polymerů běžně používaných jako izolanty, s polymery s vlastní vodivostí, které se potýkají hlavně se špatnou stabilitou v okolním prostředí a obtížnou zpracovatelností. Takovéto vodivé kompozity jsou pak vhodné jako ochranné vrstvy sloužící ke svodu elektrostatického náboje nebo k odstínění elektromagnetického pole, a k aplikacím spojených s problematikou svodu elektrického náboje. Jedná se také o čistě polymerní kompozity, což může napomoci k lepšímu prolnutí matrice s plnivem. Tyto materiály by v budoucnu mohly nahradit například polymerní kompozity s grafitem nebo sazemí.

Cílem této práce bylo mimo jiné připravit vzorky kompozitů s různými koncentracemi a typy vodivých polymerních plniv. Připravil jsem vzorky z dvou typů polymerních epoxidových matric s 1%, 3%, 5%, 7% a 10% hmotnostními koncentracemi vodivých plniv. Jako plniva byly připraveny dva typy polyanilinu, jeden dopovaný 1M kyselinou sírovou (H_2SO_4) a druhý 1M kyselinou octovou (CH_3COOH). Vodivosti takto připraveného polyanilinu byly poměrně malé, ve specializovaných laboratořích lze díky lepším podmínkám a čistotě připravit mnohem vodivější polyanilin. Po slisování do pelet měl čistý PANI- H_2SO_4 vodivost $68 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ a PANI- CH_3COOH měl vodivost $38 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. Práškový polyanilin byl do kompozitu vmíchán ručně, což mělo za následek špatnou disperzi plniva v matrici. Při přípravě prvních vzorků kompozitů s epoxidovou pryskyřicí docházelo k dedopování polyanilinu vlivem zásaditého tvrdidla. Jak jsem později zjistil, aminická tvrdidla jsou použitelná dokonce i jako rozpouštědla pro malé koncentrace PANI, a takovéto kompozity s nevodivým PANI jsou vhodné například pro antikoroziní vrstvy [28]. U druhého typu

pryskyřice byl zase problém s formou, která vydrží vytvrzování při 150 °C, aniž by došlo k deformaci povrchu vlivem tepelné roztažnosti. Tento problém byl způsoben hlavně omezenými možnostmi a nutností improvizace. Nakonec byla použita skloteflonová fólie napnutá na železné desce.

Z výsledků měření elektrických vlastností vyplývá, že takto připravené vzorky nedosahují do 10 hm.% perkolačního prahu. Vzorky s větší koncentrací jsem ale v rámci této práce, vzhledem k množství a ceně potřebného polyanilinu, již nemohl připravit. Měření naznačují, že u vzorků s plnivem PANI-CH₃COOH byla disperze rovnoměrnější, jelikož výsledky v závislosti na koncentraci vycházely mnohem lépe, než s plnivem PANI-H₂SO₄, kde se vlivem vyšší agregace plniva mnoho hodnot výrazněji odchylovalo. Vzorky s nižšími koncentracemi PANI-H₂SO₄ byly také průhlednější a PANI v nich byl na pohled více agregovaný, nežli u vzorků se stejnými koncentracemi PANI-CH₃COOH. Způsob přípravy byl ale pro všechny kompozity stejný a lišil se pouze v použité kyselině. Z toho vyplývá, že dopant polyanilinu může mít na disperzi plniva také určitý vliv. Nejvyšší naměřená vodivost byla u vzorku s 10 hm.% PANI-H₂SO₄ a to $1,23 \cdot 10^{-12} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$, tato hodnota se ale velice odchylovala od ostatních vzorků s 10 hm.% plniva, které měly vodivost maximálně $4,55539 \cdot 10^{-14} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$. To naznačuje, že mohlo dojít k náhodnému vytvoření vodivé cesty vlivem špatné disperze plniva a malé tloušťky vzorků. Z voltampérových charakteristik vyplývá, že závislost proudu na napětí má s přibývajícím obsahem plniva nelineární průběh. Všechny vzorky byly ale vodivé jen velmi málo a při napětí 500 V byly naměřeny proudy maximálně v řádech nA. Naměřené teplotní závislosti ztrátového činitele a permitivity odpovídaly teoretickým předpokladům a s rostoucí teplotou nelineárně narůstaly. Relativní permitivita a ztrátový činitel také rostly se zvyšující se koncentrací plniva. U frekvenčních charakteristik pak vycházely průběhy podle předpokladů jako pro klasické dielektrické materiály. Problémem ale byl omezený frekvenční rozsah použitého přístroje. Maximální rozsah měřicího můstku byl pouze od 20 Hz do 2 MHz. Proto z těchto charakteristik nebylo možné rozsáhleji popsat frekvenční chování materiálu, na to by bylo potřeba proměřit rozsah frekvencí alespoň od 0,01 Hz do řádů GHz, k tomu jsem ale bohužel neměl k dispozici měřicí přístroje. I přes omezený rozsah frekvencí bylo ale z charakteristik patrné, že má koncentrace plniva vliv na polarizační mechanismy. V materiálu dochází vlivem vodivého plniva k migrační polarizaci způsobující dielektrické ztráty, tím pádem s obsahem plniva roste i ztrátový činitel.

Z měření vzorků připraveného kompozitu tedy vyplývá, že vzhledem k nízkým koncentracím a hlavně velice nehomogenní disperzi plniva, nebylo dosaženo předpokládaných výsledků. Nicméně je jasné, že na výsledné elektrické vlastnosti kompozitu má největší vliv technologický postup přípravy vzorků, tzn. propojení obou složek kompozitu, aby došlo k co nehomogenějšímu rozložení a zamezilo se vniknutí nečistot nebo vzduchových bublin do materiálu. Je tedy důležité zaměřit se na vývoj co nejlepších technologických postupů, které tyto aspekty co nejlépe vyřeší. Vodivost těchto kompozitů pak může dosahovat poměrně vysokých hodnot již při relativně nízkých koncentracích plniva.

Použitá literatura

- [1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Fakulta chemická: VUT v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] KOŘÍNEK, Zdeněk. HISTORIE A POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ U LODÍ A LETADEL. *Kompozity* [online]. [cit. 2011-12-28]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [3] Xanthos, M. Polymers and Polymer Composites, in *Functional Fillers for Plastics* (ed M. Xanthos), 2005, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, FRG. doi: 10.1002/3527605096.ch1
- [4] R. Bruce. Prime. AN INTRODUCTION TO THERMOSETS. *Hermosetting Materials & Processes: Thermal Characterization, Kinetics* [online]. [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.primethermosets.com/introtothermosets.pdf>
- [5] MARTUSCELLI, Ezio. A polymer network of unsaturated polyester and bismaleimide resins: 1. Kinetics, mechanism and molecular structure. *Polymers*. 1996, Vol. 37, s. 4025-4032. DOI: S0032-3861 (96)00238-8.
- [6] Davidson, T. Conductive and Magnetic Fillers, in *Functional Fillers for Plastics* (ed M. Xanthos), 2005, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, FRG. doi: 10.1002/3527605096.ch18
- [7] ROTHON, Roger N. *Particulate-Filled Polymer Composites: 2nd Edition*. Shawbury, UK: Rapra Technology Limited, 2003. ISBN 1-85957-382-7. Dostupné z: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2216&VerticalID=0
- [8] http://war.wikipedia.org/wiki/File:Carbon_black.jpg
- [9] JIA, W., et al. Electrically conductive composites based on epoxy resin with polyaniline-DBSA fillers. *Elsevier science: Synthetic metals*. 2002, 269 - 278. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/synmet
- [10] KESTEN, Harry. What is...Percolation?. *NOTICES OF THE AMS*. 2006 (Volume 53, Nuber 5). Dostupné z: <http://www.ams.org/notices/200605/what-is-kesten.pdf>
- [11] BUNDE, Arbin a Jan W. KANTELHARDT. Introduction to Percolation Theory: (Part A). University of Giessen, Germany: Institut für Theoretische Physik III, 1996, s. 13. Dostupné z: http://www.uni-giessen.de/physik/theorie/theorie3/publications/Intro_bunde1.pdf
- [12] RHODES, Susan M. *ELECTRICALLY CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES*. 2007. Dissertation. The Graduate Faculty of the University of Akron. Vedoucí práce Dr. Roderic Quirk.
- [13] CLINGERMAN, Matthew Lee. *DEVELOPMENT AND MODELING OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE COMPOSITE MATERIALS*. 2001. Dostupné z: filebox.vt.edu/r/rragheb/articles/percoluationinthesis.pdf. Dissertation. Michigan Technological University. Vedoucí práce Julia A. King, Kirk H. Schulz.
- [14] PROKEŠ, Jan; NEŠPŮREK, Stanislav; STEJSKAL, Jaroslav. Vodivé polymery: Inteligentní materiály pro nové století, VESMÍR 80, 2001.
- [15] STEJSKAL, Jaroslav, et al. POLYANILIN A POLYPYRROL – DVA PŘEDSTAVITELÉ VODIVÝCH POLYMERŮ. *Chem. Listy*. 2001, 95, s. 484-492.
- [16] SALANECK, W. R. a J. L. BRÉDAS. CONJUGATED POLYMERS. *Solid State Communications, Voi. 92: Elsevier Science Ltd*. 1994. 0038-1098(94)00486-2.
- [17] TIITU, MARI. INVESTIGATIONS OF FUNCTIONAL ELECTROACTIVE POLYMERS. Espoo, 2006. 48 s. Dizertační práce. Helsinki University of Technology.

- [18] PRATT, Colin. CONDUCTING POLYMERS. 1996. Dostupné z: <http://homepage.ntlworld.com/colin.pratt/cpoly.pdf>
- [19] SCHOCH, K.F. Electrically Conductive Polymers and Their Applications. *Electrical insulation magazine*. 1986, vol. 2, s. 20-25.
- [20] MOLITON, André. HANDBOOK OF CONDUCTING POLYMERS. New York: Marcel Dekker, 1998. Ion Implantation Doping of Electroactive Polymers and Device Fabrication, s. 589-639.
- [21] SHIRAKAWA, Hideki. *HANDBOOK OF CONDUCTING POLYMERS*. New York : Marcel Dekker, 1998. Synthesis of Polyacetylene, s. 197-209.
- [22] HOLZE, Rudolf. Spectroelectrochemistry of conductive polymers, Chapter 6. *Handbook of advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*. Los Angeles, USA: Academic press, 2001, 209 - 286. ISBN 0-12-513758-3.
- [23] KEITHLEY INSTRUMENTS, Inc. *Model 8009 Resistivity test fixture: Instruction Manual*. 1995. Dokument 8009-901-01 Rev. B. Dostupné z: www.keithley.com
- [24] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Plzeň, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [25] AGILENT TECHNOLOGIES JAPAN, Ltd. *Agilent 16451B dielectric test fixture: Operation and Service Manual*. Japan, 2000. Agilent Part No. 16451-90020.
- [26] TSOTRA, P., et al. Thermal, mechanical, and electrical properties of epoxy resin/polyaniline-dodecylbenzenesulfonic acid blends. *Synthetic metals* 143. 2003, s. 237-242. DOI: 10.1016/j.synthmet.2003.12.016. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/synthmet
- [27] YANG, Qinghao, et al. Preparation of Conductive Polyaniline/Epoxy Composite. *Polymer composites*. 2006, s. 201-204. DOI: 10.1002/pc.20176. Dostupné z: www.interscience.wiley.com
- [28] TITTU, MARI, et al. Aminic epoxy resin hardeners as reactive solvents for conjugated polymers: polyaniline base/epoxy composites for anticorrosion coatings. Elsevier Ltd., *Polymer* 46. 2005. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.05.119.

Přílohy

Naměřené a vypočtené hodnoty

V tabulkách jsou jednotlivé vzorky značeny následovně: **XXYZ**

XX - hmotnostní koncentrace plniva (01, 03, 05, 07, 10)

Y - typ dopantu (O – kyselina octová, S – kyselina sírová)

Z - označení daného vzorku (A, B, C, nebo P-průměr)

- **Stejnoseměrné charakteristiky**

V-A charakteristika (LETOXIT PR 108, PANI-CH₃COOH)

| U [V] | I [pA] | | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| | 100A | 100B | 070A | 070B | 050A | 050B | 030A | 030B | 010A | 010B |
| 500 | 2830 | 1450 | 1220 | 1940 | 59 | 248 | 33 | 7,4 | 2,1 | 0,6 |
| 350 | 816 | 400 | 365 | 560 | 20 | 72,5 | 10 | 3,9 | 1,6 | 0,3 |
| 200 | 298 | 90 | 78 | 156 | 14,3 | 15 | 4 | 2,8 | 1,1 | 0,15 |
| 100 | 75 | 20,5 | 18,1 | 19,8 | 4,8 | 4,1 | 1,4 | 1,5 | 0,8 | 0,1 |
| 50 | 24 | 5,8 | 6 | 3,7 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,8 | 0,5 | 0,05 |
| 20 | 7,3 | 1,3 | 1,9 | 0,6 | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,05 |
| 10 | 2,9 | 0,6 | 0,9 | 0,2 | -0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| 5 | 0,9 | 0,3 | 0,5 | -0,05 | -0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| 2 | -0,3 | 0,2 | 0,3 | -0,2 | -0,6 | 0,05 | 0 | 0,1 | 0,1 | -0,05 |
| 1 | -2,4 | 0,1 | 0,2 | -0,3 | -1,3 | 0,05 | -0,1 | 0,1 | 0,1 | -0,05 |
| -1 | -3,9 | -5,5 | -5,7 | -3,9 | -6,8 | -1,3 | -1,2 | -2,1 | -0,7 | -0,15 |
| -2 | -3,3 | -4,6 | -4,7 | -3,2 | -6 | -0,9 | -1,1 | -1,6 | -0,5 | -0,1 |
| -5 | -3,7 | -4,4 | -3,9 | -3 | -5,8 | -0,9 | -1 | -1,4 | -0,3 | -0,1 |
| -10 | -5,2 | -4,1 | -4,1 | -3 | -4 | -0,9 | -0,9 | -1,4 | -0,3 | -0,1 |
| -20 | -9,1 | -5,6 | -4,2 | -3 | -4,3 | -1 | -1 | -1,5 | -0,3 | -0,1 |
| -50 | -26,2 | -11 | -9,8 | -7,7 | -7,5 | -2,8 | -1,5 | -1,9 | -0,5 | -0,15 |
| -100 | -70,9 | -26 | -24,3 | -23 | -11,5 | -6,6 | -2,9 | -2,5 | -0,6 | -0,2 |
| -200 | -277 | -99 | -91 | -97 | -24 | -19,8 | -6,8 | -3 | -1,2 | -0,4 |
| -350 | -830 | -460 | -400 | -480 | -22 | -80 | -10 | -4,2 | -1,4 | -0,6 |
| -500 | -2930 | -1670 | -1330 | -1550 | -62,4 | -250 | -36 | -5,5 | -1,7 | -0,75 |

Výpočet měrné vodivosti

| | G [S] | d [cm] | S [cm ²] | σ [S·cm ⁻¹] |
|--------|----------|---------|----------------------|--------------------------------|
| 100A | 5,66E-12 | 0,16542 | 22,9 | 4,09E-14 |
| 070A | 2,44E-12 | 0,18682 | 22,9 | 1,99E-14 |
| 050A | 1,18E-13 | 0,17468 | 22,9 | 9E-16 |
| 030A | 6,6E-14 | 0,17046 | 22,9 | 4,91E-16 |
| 010A | 4,2E-15 | 0,15454 | 22,9 | 2,83E-17 |
| 100B | 6,18E-12 | 0,1688 | 22,9 | 4,56E-14 |
| 070B | 7,24E-12 | 0,18198 | 22,9 | 5,75E-14 |
| 050B | 1,56E-13 | 0,17164 | 22,9 | 1,17E-15 |
| 030B | 1,52E-13 | 0,16456 | 22,9 | 1,09E-15 |
| 010B | 2,6E-15 | 0,15108 | 22,9 | 1,72E-17 |
| PR 108 | 2,2E-15 | 0,1678 | 22,9 | 1,61E-17 |

Příklad výpočtu pro vzorek 100A:

$$G = \left(\frac{U}{I}\right)^{-1} = \left(\frac{500}{2830 \times 10^{-12}}\right)^{-1} 5,66 \cdot 10^{-12} \text{ S} \quad \sigma = G \cdot \frac{d}{S} = 5,66 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0,16542}{22,9} = 4,09 \cdot 10^{-14} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$$

V-A charakteristika (LETOXIT PR 108, PANI-H₂SO₄)

| U [V] | I [pA] | | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| | 10SA | 10SB | 07SA | 07SB | 05SA | 05SB | 03SA | 03SB | 01SA | 01SB |
| 500 | 74500 | 1450 | 12 | 1940 | 10 | 248 | 1,8 | 7,4 | 0,7 | 0,6 |
| 350 | 30500 | 400 | 10 | 560 | 7,3 | 72,5 | 1,4 | 3,9 | 0,5 | 0,3 |
| 200 | 5320 | 90 | 7 | 156 | 2,5 | 15 | 0,6 | 2,8 | 0,3 | 0,15 |
| 100 | 555 | 20,5 | 4,2 | 19,8 | 0,9 | 4,1 | 0,3 | 1,5 | 0,1 | 0,1 |
| 50 | 109 | 5,8 | 1,6 | 3,7 | 0,5 | 1,5 | 0,15 | 0,8 | 0,05 | 0,05 |
| 20 | 14,4 | 1,3 | 0,5 | 0,6 | 0,2 | 0,5 | 0,1 | 0,3 | 0,01 | 0,05 |
| 10 | 4,8 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,05 | 0,2 | 0 | 0 |
| 5 | 2 | 0,3 | 0,05 | -0,05 | 0 | 0,1 | 0,01 | 0,2 | -0,05 | 0 |
| 2 | 0,7 | 0,2 | 0 | -0,2 | 0 | 0,05 | 0,01 | 0,1 | -0,05 | -0,05 |
| 1 | 0,4 | 0,1 | -0,05 | -0,3 | -0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,1 | -0,05 | -0,05 |
| -1 | -4,2 | -5,5 | -1,2 | -3,9 | -1,3 | -1,3 | -0,2 | -2,1 | -0,1 | -0,15 |
| -2 | -3,8 | -4,6 | -0,9 | -3,2 | -1,1 | -0,9 | -0,1 | -1,6 | -0,1 | -0,1 |
| -5 | -4,6 | -4,4 | -0,9 | -3 | -1 | -0,9 | -0,1 | -1,4 | -0,05 | -0,1 |
| -10 | -7 | -4,1 | -1 | -3 | -1 | -0,9 | -0,1 | -1,4 | -0,05 | -0,1 |
| -20 | -14 | -5,6 | -1,4 | -3 | -1 | -1 | -0,1 | -1,5 | -0,05 | -0,1 |
| -50 | -60 | -11 | -3,1 | -7,7 | -1,4 | -2,8 | -0,2 | -1,9 | -0,1 | -0,15 |
| -100 | -279 | -26 | -7 | -23 | -2,4 | -6,6 | -0,5 | -2,5 | -0,2 | -0,2 |
| -200 | -2244 | -99 | -8,6 | -97 | -4,4 | -19,8 | -1 | -3 | -0,4 | -0,4 |
| -350 | -15020 | -460 | -14 | -480 | -8,2 | -80 | -1,3 | -4,2 | -0,6 | -0,6 |
| -500 | -48000 | -1670 | -14 | -1550 | -10,3 | -250 | -1,7 | -5,5 | -0,8 | -0,75 |

Výpočet měrné vodivosti

| | G [S] | d [cm] | S [cm ²] | σ [S·cm ⁻¹] |
|------|----------|---------|----------------------|-------------------------|
| 10SA | 1,49E-10 | 0,1884 | 22,9 | 1,23E-12 |
| 07SA | 2,4E-14 | 0,16072 | 22,9 | 1,68E-16 |
| 05SA | 2E-14 | 0,1671 | 22,9 | 1,46E-16 |
| 03SA | 3,6E-15 | 0,16464 | 22,9 | 2,59E-17 |
| 01SA | 1,4E-15 | 0,16194 | 22,9 | 9,9E-18 |
| 10SB | 2,9E-12 | 0,17094 | 22,9 | 2,16E-14 |
| 07SB | 3,88E-12 | 0,1697 | 22,9 | 2,88E-14 |
| 05SB | 4,96E-13 | 0,17202 | 22,9 | 3,73E-15 |
| 03SB | 1,48E-14 | 0,17022 | 22,9 | 1,1E-16 |
| 01SB | 1,2E-15 | 0,15686 | 22,9 | 8,22E-18 |

Příklad výpočtu pro vzorek 10SB:

$$G = \left(\frac{U}{I}\right)^{-1} = \left(\frac{500}{1450 \times 10^{-12}}\right)^{-1} 2,9 \cdot 10^{-12} \text{ S} \quad \sigma = G \cdot \frac{d}{S} = 2,9 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0,17094}{22,9} = 2,16 \cdot 10^{-14} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Výpočet měrné vodivosti dedopovaných vzorků (LETOXIT PR 102, PANI-CH₃COOH)

| | U [V] | I [pA] | G [S] | d [cm] | S [cm ²] | σ [S·cm ⁻¹] |
|--------|-------|--------|-------------|---------|----------------------|-------------------------|
| 100A | 500 | 155 | 3,1E-13 | 0,1004 | 22,9 | 1,35913E-15 |
| 100B | | 890 | 1,78E-12 | 0,09068 | | 7,04849E-15 |
| 100C | | 320 | 6,4E-13 | 0,10216 | | 2,85513E-15 |
| 070A | | 78 | 1,56E-13 | 0,09928 | | 6,76318E-16 |
| 070B | | 97 | 1,94E-13 | 0,09486 | | 8,03617E-16 |
| 070C | | 54 | 1,08E-13 | 0,08956 | | 4,22379E-16 |
| 050A | | 82 | 1,64E-13 | 0,09698 | | 6,94529E-16 |
| 050B | | 28 | 5,6E-14 | 0,1166 | | 2,85135E-16 |
| 050C | | 50 | 1E-13 | 0,09486 | | 4,14236E-16 |
| 030A | | 25 | 5E-14 | 0,11066 | | 2,41616E-16 |
| 030B | | 26 | 5,2E-14 | 0,11028 | | 2,50417E-16 |
| 030C | | 31,8 | 6,36E-14 | 0,11052 | | 3,06946E-16 |
| 010A | | 12,3 | 2,46E-14 | 0,15778 | | 1,69493E-16 |
| 010B | | 15,1 | 3,02E-14 | 0,16472 | | 2,17229E-16 |
| PR 102 | | 17 | 2,25677E-16 | 0,152 | | 2,25677E-16 |

Příklad výpočtu pro vzorek 10SA:

$$G = \left(\frac{U}{I}\right)^{-1} = \left(\frac{500}{155 \times 10^{-12}}\right)^{-1} 3,1 \cdot 10^{-13} \text{ S} \quad \sigma = G \cdot \frac{d}{S} = 3,1 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{0,1}{22,9} = 1,36 \cdot 10^{-15} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$$

- Teplotní charakteristiky

Plocha elektrodového systému TETTEX: S = 20 cm².

Naměřený ztrátový činitel v závislosti na teplotě

| T [°C] | tg δ [-] | | | | | | | | | | |
|--------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | 01SA | 01SB | 03SA | 03SB | 05SA | 05SB | 07SA | 07SB | 10SA | 10SB | PR 108 |
| 35 | 0,00217 | 0,00234 | 0,00485 | 0,00483 | 0,0076 | 0,00789 | 0,01573 | 0,01059 | 0,0192 | 0,01493 | 0,0017 |
| 45 | 0,00202 | 0,00212 | 0,00473 | 0,00484 | 0,00765 | 0,00795 | 0,0155 | 0,01068 | 0,0211 | 0,01525 | 0,0016 |
| 55 | 0,0021 | 0,00203 | 0,00467 | 0,00492 | 0,00764 | 0,00816 | 0,0154 | 0,01081 | 0,0229 | 0,01569 | 0,0014 |
| 75 | 0,00197 | 0,00209 | 0,00476 | 0,00579 | 0,00794 | 0,00868 | 0,01532 | 0,01129 | 0,02844 | 0,01638 | 0,0014 |
| 95 | 0,00216 | 0,00253 | 0,00535 | 0,00696 | 0,00854 | 0,00996 | 0,0158 | 0,01201 | 0,03399 | 0,01715 | 0,0019 |
| 115 | 0,00606 | 0,0129 | 0,01564 | 0,01251 | 0,01304 | 0,01858 | 0,02821 | 0,01792 | 0,07747 | 0,02881 | 0,0062 |

| T [°C] | tg δ [-] | | | | | | | | | |
|--------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 010A | 010B | 030A | 030B | 050A | 050B | 070A | 070B | 100A | 100B |
| 35 | 0,00199 | 0,00226 | 0,00504 | 0,00549 | 0,01178 | 0,01142 | 0,02492 | 0,01613 | 0,03956 | 0,04448 |
| 45 | 0,00193 | 0,0021 | 0,00516 | 0,0056 | 0,01222 | 0,01239 | 0,02578 | 0,01703 | 0,04099 | 0,04657 |
| 55 | 0,00187 | 0,00213 | 0,00538 | 0,00556 | 0,01317 | 0,01316 | 0,02739 | 0,01809 | 0,04284 | 0,04944 |
| 75 | 0,00195 | 0,00222 | 0,00598 | 0,00576 | 0,01583 | 0,01557 | 0,0314 | 0,02043 | 0,04675 | 0,05563 |
| 95 | 0,00233 | 0,00262 | 0,00704 | 0,00644 | 0,01879 | 0,01891 | 0,03547 | 0,0234 | 0,0507 | 0,06382 |
| 115 | 0,00523 | 0,00529 | 0,01027 | 0,00933 | 0,02659 | 0,02804 | 0,04459 | 0,03617 | 0,05801 | 0,07127 |

Naměřená paralelní kapacita v závislosti na teplotě

| T [°C] | C [F] | | | | | | | | | | |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 01SA | 01SB | 03SA | 03SB | 05SA | 05SB | 07SA | 07SB | 10SA | 10SB | PR 108 |
| 35 | 2,4E-11 | 2,8E-11 | 2,6E-11 | 2,3E-11 | 2,5E-11 | 2,3E-11 | 3,6E-11 | 2,2E-11 | 2,5E-11 | 2,2E-11 | 2,4E-11 |
| 45 | 2,4E-11 | 2,8E-11 | 2,6E-11 | 2,3E-11 | 2,5E-11 | 2,3E-11 | 3,6E-11 | 2,3E-11 | 2,5E-11 | 2,2E-11 | 2,4E-11 |
| 55 | 2,4E-11 | 2,8E-11 | 2,6E-11 | 2,3E-11 | 2,5E-11 | 2,3E-11 | 3,7E-11 | 2,3E-11 | 2,5E-11 | 2,2E-11 | 2,4E-11 |
| 75 | 2,5E-11 | 2,8E-11 | 2,6E-11 | 2,3E-11 | 2,5E-11 | 2,4E-11 | 3,7E-11 | 2,3E-11 | 2,6E-11 | 2,2E-11 | 2,4E-11 |
| 95 | 2,5E-11 | 2,9E-11 | 2,7E-11 | 2,4E-11 | 2,6E-11 | 2,4E-11 | 3,8E-11 | 2,3E-11 | 2,7E-11 | 2,3E-11 | 2,5E-11 |
| 115 | 2,5E-11 | 3E-11 | 2,8E-11 | 2,5E-11 | 2,6E-11 | 2,5E-11 | 4,1E-11 | 2,5E-11 | 3,1E-11 | 2,6E-11 | 2,5E-11 |

| T [°C] | C [F] | | | | | | | | | |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 010A | 010B | 030A | 030B | 050A | 050B | 070A | 070B | 100A | 100B |
| 35 | 2,1E-11 | 2,2E-11 | 1,8E-11 | 2,1E-11 | 2E-11 | 2,2E-11 | 2,8E-11 | 2,3E-11 | 2,9E-11 | 3,1E-11 |
| 45 | 2,1E-11 | 2,2E-11 | 1,8E-11 | 2,1E-11 | 2E-11 | 2,2E-11 | 2,8E-11 | 2,3E-11 | 2,9E-11 | 3,2E-11 |
| 55 | 2,1E-11 | 2,2E-11 | 1,8E-11 | 2,1E-11 | 2E-11 | 2,3E-11 | 2,8E-11 | 2,3E-11 | 2,9E-11 | 3,2E-11 |
| 75 | 2,2E-11 | 2,2E-11 | 1,8E-11 | 2,1E-11 | 2,1E-11 | 2,3E-11 | 2,9E-11 | 2,4E-11 | 3E-11 | 3,3E-11 |
| 95 | 2,2E-11 | 2,3E-11 | 1,8E-11 | 2,1E-11 | 2,1E-11 | 2,3E-11 | 2,9E-11 | 2,4E-11 | 3E-11 | 3,4E-11 |
| 115 | 2,2E-11 | 2,3E-11 | 1,8E-11 | 2,2E-11 | 2,2E-11 | 2,4E-11 | 3,1E-11 | 2,5E-11 | 3,2E-11 | 3,6E-11 |

Vypočtená relativní permitivita vzorků

| T [°C] | ϵ_r [-] | | | | | | | | | | |
|--------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 01SA | 01SB | 03SA | 03SB | 05SA | 05SB | 07SA | 07SB | 10SA | 10SB | PR 108 |
| 35 | 2,208 | 2,464 | 2,387 | 2,201 | 2,328 | 2,248 | 3,267 | 2,156 | 2,619 | 2,089 | 2,266 |
| 45 | 2,215 | 2,475 | 2,398 | 2,209 | 2,340 | 2,257 | 3,286 | 2,163 | 2,637 | 2,099 | 2,271 |
| 55 | 2,227 | 2,489 | 2,415 | 2,225 | 2,356 | 2,272 | 3,319 | 2,181 | 2,665 | 2,115 | 2,279 |
| 75 | 2,252 | 2,520 | 2,451 | 2,256 | 2,386 | 2,302 | 3,389 | 2,214 | 2,742 | 2,148 | 2,309 |
| 95 | 2,276 | 2,554 | 2,488 | 2,292 | 2,419 | 2,336 | 3,465 | 2,251 | 2,842 | 2,204 | 2,336 |
| 115 | 2,329 | 2,669 | 2,610 | 2,371 | 2,495 | 2,434 | 3,728 | 2,356 | 3,345 | 2,484 | 2,392 |

| T [°C] | ϵ_r [-] | | | | | | | | | |
|--------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 010A | 010B | 030A | 030B | 050A | 050B | 070A | 070B | 100A | 100B |
| 35 | 1,840 | 1,877 | 1,693 | 1,916 | 1,991 | 2,159 | 2,932 | 2,357 | 2,668 | 3,002 |
| 45 | 1,847 | 1,884 | 1,698 | 1,925 | 1,997 | 2,169 | 2,947 | 2,368 | 2,687 | 3,027 |
| 55 | 1,854 | 1,893 | 1,706 | 1,933 | 2,010 | 2,182 | 2,975 | 2,386 | 2,715 | 3,067 |
| 75 | 1,878 | 1,911 | 1,726 | 1,951 | 2,045 | 2,219 | 3,036 | 2,423 | 2,777 | 3,156 |
| 95 | 1,899 | 1,928 | 1,745 | 1,967 | 2,076 | 2,257 | 3,091 | 2,465 | 2,843 | 3,261 |
| 115 | 1,939 | 1,962 | 1,779 | 2,005 | 2,150 | 2,348 | 3,230 | 2,606 | 2,982 | 3,465 |

Příklad výpočtu pro vzorek 100B při teplotě 35 °C:

$$\epsilon = C \cdot \frac{d}{S} = 2,2 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{0,1688}{20} = 2,657 \cdot 10^{-13} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{2,657 \cdot 10^{-13}}{8,8541 \cdot 10^{-14}} = 3,002$$

- **Frekvenční charakteristiky**

- Z naměřených hodnot lze vypočítat imaginární a reálné složky impedance a permitivity, pomocí fázových úhlů φ a δ .
- Plocha elektrodového systému Agilent: $S = 11,34 \text{ cm}^2$.

Frekvenční závislost impedance (vzorky s jednotlivými typy dopantů jsou zprůměrované)

| F [Hz] | Z [Ω] | | | | | | | | | | |
|---------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 01SP | 01OP | 03SP | 03OP | 05SP | 05OP | 07SP | 07OP | 10SP | 10OP | PR 108 |
| 991 | 9631505 | 9635550 | 1,2E+07 | 1E+07 | 1,2E+07 | 1E+07 | 8647745 | 8538245 | 9260510 | 6268285 | 9896270 |
| 1204 | 7929040 | 7932675 | 1E+07 | 8496280 | 9802960 | 8230545 | 7120155 | 7030955 | 7622895 | 5161515 | 8144440 |
| 1464 | 6527765 | 6531035 | 8456370 | 6995065 | 8076085 | 6777015 | 5864200 | 5788890 | 6279580 | 4249690 | 6707390 |
| 1779 | 5377795 | 5381690 | 6968945 | 5762910 | 6656650 | 5584990 | 4834235 | 4770135 | 5176435 | 3503145 | 5527720 |
| 2162 | 4428675 | 4428915 | 5736930 | 4746110 | 5479595 | 4598245 | 3982395 | 3929235 | 4262340 | 2885505 | 4549170 |
| 2628 | 3647450 | 3648525 | 4724645 | 3908525 | 4513505 | 3787745 | 3281400 | 3236335 | 3511395 | 2377345 | 3748610 |
| 3195 | 3003505 | 3004090 | 3890105 | 3218495 | 3716430 | 3119640 | 2703535 | 2665740 | 2892440 | 1958080 | 3086380 |
| 3883 | 2474340 | 2475035 | 3204975 | 2651395 | 3062200 | 2569595 | 2228070 | 2196370 | 2383160 | 1613360 | 2543070 |
| 4720 | 2037925 | 2038310 | 2638615 | 2183305 | 2521735 | 2116445 | 1835505 | 1809060 | 1963090 | 1328935 | 2093910 |
| 5737 | 1678690 | 1679190 | 2173655 | 1798460 | 2077500 | 1743465 | 1512545 | 1490225 | 1617195 | 1094817 | 1725330 |
| 6973 | 1382895 | 1383220 | 1790275 | 1481480 | 1711290 | 1436285 | 1246410 | 1227760 | 1332340 | 901941 | 1421190 |
| 8475 | 1139165 | 1139380 | 1474565 | 1220310 | 1409735 | 1183169 | 1027058 | 1011519 | 1097655 | 743139 | 1170780 |
| 10301 | 938627 | 938789 | 1214750 | 1005460 | 1161460 | 974867 | 846453 | 833539 | 904440 | 612303 | 964711 |
| 12521 | 773255 | 773417 | 1000695 | 828312 | 956803 | 803206 | 697480 | 686775 | 745119 | 504468 | 794853 |
| 15219 | 636910 | 637057 | 824187 | 682233 | 788050 | 661621 | 574627 | 565756 | 613771 | 415572 | 654730 |
| 18498 | 524752 | 524867 | 678955 | 562079 | 649252 | 545133 | 473506 | 466192 | 505681 | 342399 | 539440 |
| 22484 | 432468 | 432554 | 559479 | 463202 | 535026 | 449284 | 390295 | 384264 | 416737 | 282216 | 444585 |
| 27329 | 356233 | 356315 | 460791 | 381556 | 440682 | 370115 | 321541 | 316591 | 343273 | 232497 | 366249 |
| 33218 | 293512 | 293585 | 379622 | 314368 | 363061 | 304987 | 264961 | 260911 | 282817 | 191595 | 301760 |
| 40375 | 241852 | 241917 | 312768 | 259029 | 299124 | 251318 | 218336 | 215036 | 233015 | 157896 | 248657 |
| 49075 | 199296 | 199361 | 257695 | 213457 | 246469 | 207131 | 179931 | 177250 | 192001 | 130145 | 204910 |
| 59649 | 164252 | 164310 | 212352 | 175922 | 203096 | 170731 | 148292 | 146131 | 158219 | 107290 | 168888 |
| 72502 | 135374 | 135428 | 174987 | 144997 | 167356 | 140739 | 122222 | 120485 | 130379 | 88456,5 | 139198 |
| 88125 | 111581 | 111635 | 144205 | 119519 | 137915 | 116023 | 100733 | 99347,6 | 107442 | 72934 | 114736 |
| 107113 | 91981,4 | 92032,5 | 118852 | 98528,5 | 113665 | 95662,7 | 83033,4 | 81935,6 | 88548,5 | 60149,8 | 94582,6 |
| 130194 | 75810 | 75860,5 | 97939,7 | 81214,8 | 93658,9 | 78864,4 | 68427,1 | 67566,8 | 72961,5 | 49600,3 | 77956,8 |
| 158247 | 62518,2 | 62567,6 | 80748,4 | 66983,6 | 77217,2 | 65057,6 | 56421,4 | 55754,6 | 60152,6 | 40930,6 | 64289,3 |
| 192345 | 51540,9 | 51589,3 | 66556,7 | 55230,1 | 63640,2 | 53652,5 | 46506,4 | 45996,1 | 49574,5 | 33769 | 53002,9 |
| 233790 | 42484,9 | 42532,1 | 54848,7 | 45534,7 | 52440,9 | 44243,9 | 38328,6 | 37945,7 | 40850,8 | 27860 | 43691 |
| 284166 | 35032,1 | 35077,9 | 45213,4 | 37554,2 | 43224,2 | 36498,2 | 31597,5 | 31317,8 | 33671,4 | 22995,6 | 36025,9 |
| 345397 | 28893,8 | 28938,6 | 37281,3 | 30984,7 | 35638,7 | 30118,7 | 26056,2 | 25857,7 | 27761,8 | 18988,9 | 29715,5 |
| 419821 | 23832,5 | 23875,8 | 30741,8 | 25565,8 | 29386 | 24859 | 21486,1 | 21353,3 | 22889,5 | 15684,5 | 24510,7 |
| 510281 | 19656,8 | 19698,7 | 25350,5 | 21095 | 24228,8 | 20519,2 | 17717,4 | 17636,1 | 18871,5 | 12957,8 | 20216,3 |
| 620234 | 16217,9 | 16258,3 | 20909,4 | 17413,5 | 19983 | 16944 | 14615,2 | 14573,7 | 15564,8 | 10711,7 | 16680,3 |
| 753878 | 13382,6 | 13420,8 | 17248,2 | 14376,8 | 16482,9 | 13994,6 | 12057 | 12046,6 | 12837,9 | 8858,03 | 13764,2 |
| 916320 | 11046,9 | 11083,4 | 14234,2 | 11875,8 | 13601,3 | 11565,5 | 9950,65 | 9963,67 | 10594,4 | 7330,96 | 11362,2 |
| 1113763 | 9120,68 | 9155,36 | 11749 | 9812,47 | 11225,9 | 9560,87 | 8214,14 | 8244,82 | 8744,25 | 6070,51 | 9380,7 |
| 1353750 | 7536,69 | 7569,67 | 9705,5 | 8115,48 | 9272,85 | 7912,23 | 6786,63 | 6830,11 | 7223,41 | 5033,08 | 7752,06 |
| 1645448 | 6236,16 | 6266,78 | 8028,79 | 6721,6 | 7670,04 | 6557,64 | 5614,44 | 5667,06 | 5975,25 | 4180,41 | 6414,36 |
| 2000000 | 5163,71 | 5192,5 | 6646,55 | 5571,88 | 6349,27 | 5440,08 | 4648,59 | 4707,13 | 4946,46 | 3476,51 | 5311,33 |

Frekvenční závislost fázového úhlu impedance φ

| f [Hz] | φ [°] | | | | | | | | | | |
|---------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 01SP | 01OP | 03OS | 03OP | 05SP | 05OP | 07SP | 07OP | 10SP | 10OP | PR 108 |
| 991 | -89,555 | -89,592 | -89,571 | -89,55 | -89,535 | -89,492 | -89,351 | -89,412 | -89,334 | -89,193 | -89,586 |
| 1204 | -89,532 | -89,543 | -89,541 | -89,522 | -89,485 | -89,451 | -89,315 | -89,39 | -89,327 | -89,188 | -89,507 |
| 1464 | -89,517 | -89,534 | -89,526 | -89,512 | -89,482 | -89,457 | -89,321 | -89,386 | -89,33 | -89,215 | -89,507 |
| 1779 | -89,505 | -89,507 | -89,504 | -89,496 | -89,484 | -89,45 | -89,291 | -89,382 | -89,337 | -89,231 | -89,513 |
| 2162 | -89,497 | -89,491 | -89,522 | -89,494 | -89,459 | -89,432 | -89,298 | -89,381 | -89,34 | -89,244 | -89,477 |
| 2628 | -89,478 | -89,492 | -89,498 | -89,48 | -89,455 | -89,422 | -89,287 | -89,382 | -89,344 | -89,259 | -89,46 |
| 3195 | -89,462 | -89,472 | -89,484 | -89,47 | -89,453 | -89,417 | -89,286 | -89,366 | -89,343 | -89,267 | -89,45 |
| 3883 | -89,455 | -89,455 | -89,467 | -89,454 | -89,436 | -89,409 | -89,283 | -89,361 | -89,341 | -89,273 | -89,429 |
| 4720 | -89,431 | -89,439 | -89,458 | -89,436 | -89,432 | -89,391 | -89,278 | -89,342 | -89,336 | -89,27 | -89,421 |
| 5737 | -89,424 | -89,419 | -89,446 | -89,422 | -89,421 | -89,378 | -89,272 | -89,333 | -89,342 | -89,268 | -89,403 |
| 6973 | -89,408 | -89,409 | -89,43 | -89,413 | -89,41 | -89,361 | -89,276 | -89,316 | -89,342 | -89,259 | -89,387 |
| 8475 | -89,387 | -89,384 | -89,416 | -89,394 | -89,397 | -89,343 | -89,264 | -89,296 | -89,331 | -89,246 | -89,376 |
| 10301 | -89,373 | -89,366 | -89,402 | -89,377 | -89,384 | -89,322 | -89,261 | -89,276 | -89,328 | -89,233 | -89,355 |
| 12521 | -89,361 | -89,35 | -89,391 | -89,361 | -89,378 | -89,303 | -89,258 | -89,255 | -89,326 | -89,215 | -89,341 |
| 15219 | -89,345 | -89,332 | -89,376 | -89,343 | -89,366 | -89,284 | -89,253 | -89,232 | -89,319 | -89,193 | -89,327 |
| 18498 | -89,328 | -89,314 | -89,362 | -89,325 | -89,355 | -89,262 | -89,249 | -89,205 | -89,31 | -89,166 | -89,312 |
| 22484 | -89,308 | -89,294 | -89,344 | -89,304 | -89,344 | -89,236 | -89,241 | -89,176 | -89,303 | -89,134 | -89,294 |
| 27329 | -89,29 | -89,27 | -89,326 | -89,279 | -89,33 | -89,208 | -89,233 | -89,14 | -89,293 | -89,096 | -89,274 |
| 33218 | -89,269 | -89,244 | -89,308 | -89,254 | -89,316 | -89,177 | -89,224 | -89,102 | -89,282 | -89,054 | -89,254 |
| 40375 | -89,246 | -89,218 | -89,288 | -89,225 | -89,301 | -89,144 | -89,214 | -89,061 | -89,271 | -89,007 | -89,235 |
| 49075 | -89,222 | -89,187 | -89,267 | -89,192 | -89,285 | -89,107 | -89,201 | -89,014 | -89,257 | -88,952 | -89,211 |
| 59649 | -89,196 | -89,155 | -89,245 | -89,158 | -89,266 | -89,066 | -89,187 | -88,964 | -89,242 | -88,893 | -89,186 |
| 72502 | -89,17 | -89,122 | -89,221 | -89,121 | -89,249 | -89,023 | -89,172 | -88,908 | -89,226 | -88,827 | -89,16 |
| 88125 | -89,143 | -89,087 | -89,198 | -89,082 | -89,23 | -88,977 | -89,156 | -88,849 | -89,21 | -88,754 | -89,134 |
| 107113 | -89,115 | -89,051 | -89,174 | -89,041 | -89,211 | -88,928 | -89,139 | -88,785 | -89,191 | -88,674 | -89,107 |
| 130194 | -89,088 | -89,014 | -89,149 | -88,997 | -89,19 | -88,875 | -89,119 | -88,716 | -89,172 | -88,587 | -89,081 |
| 158247 | -89,061 | -88,976 | -89,126 | -88,953 | -89,171 | -88,821 | -89,1 | -88,643 | -89,152 | -88,493 | -89,054 |
| 192345 | -89,034 | -88,938 | -89,104 | -88,907 | -89,151 | -88,763 | -89,08 | -88,564 | -89,13 | -88,39 | -89,029 |
| 233790 | -89,007 | -88,899 | -89,079 | -88,858 | -89,129 | -88,701 | -89,058 | -88,48 | -89,108 | -88,276 | -89,002 |
| 284166 | -88,983 | -88,861 | -89,056 | -88,806 | -89,107 | -88,637 | -89,036 | -88,392 | -89,084 | -88,154 | -88,978 |
| 345397 | -88,959 | -88,823 | -89,035 | -88,757 | -89,086 | -88,568 | -89,013 | -88,296 | -89,059 | -88,021 | -88,958 |
| 419821 | -88,936 | -88,784 | -89,013 | -88,703 | -89,064 | -88,497 | -88,987 | -88,195 | -89,031 | -87,878 | -88,936 |
| 510281 | -88,914 | -88,745 | -88,993 | -88,647 | -89,041 | -88,421 | -88,96 | -88,088 | -89,002 | -87,72 | -88,916 |
| 620234 | -88,892 | -88,707 | -88,97 | -88,589 | -89,017 | -88,339 | -88,929 | -87,973 | -88,969 | -87,552 | -88,895 |
| 753878 | -88,871 | -88,669 | -88,948 | -88,529 | -88,991 | -88,253 | -88,899 | -87,852 | -88,932 | -87,367 | -88,878 |
| 916320 | -88,848 | -88,628 | -88,923 | -88,463 | -88,962 | -88,16 | -88,861 | -87,72 | -88,893 | -87,174 | -88,86 |
| 1113763 | -88,824 | -88,586 | -88,9 | -88,394 | -88,933 | -88,06 | -88,822 | -87,582 | -88,848 | -86,964 | -88,837 |
| 1353750 | -88,801 | -88,543 | -88,867 | -88,324 | -88,893 | -87,954 | -88,779 | -87,434 | -88,797 | -86,735 | -88,82 |
| 1645448 | -88,783 | -88,507 | -88,843 | -88,255 | -88,862 | -87,849 | -88,737 | -87,288 | -88,75 | -86,501 | -88,806 |
| 2000000 | -88,764 | -88,471 | -88,818 | -88,181 | -88,826 | -87,736 | -88,69 | -87,128 | -88,691 | -86,259 | -88,793 |

Frekvenční závislost kapacity

| F [Hz] | C [pF] | | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 01SP | 01OP | 03OS | 03OP | 05SP | 05OP | 07SP | 07OP | 10SP | 10OP | PR 108 |
| 991 | 16,7485 | 16,768 | 13,7308 | 15,6254 | 13,6924 | 16,5597 | 18,6808 | 18,8466 | 18,0758 | 27,0786 | 16,2274 |
| 1204 | 16,7475 | 16,7644 | 13,7282 | 15,6252 | 13,6881 | 16,5555 | 18,6643 | 18,8374 | 18,0697 | 27,0453 | 16,2257 |
| 1464 | 16,7327 | 16,7455 | 13,7094 | 15,606 | 13,6722 | 16,5309 | 18,6395 | 18,8132 | 18,0414 | 27,0065 | 16,2081 |
| 1779 | 16,7097 | 16,7268 | 13,6912 | 15,5821 | 13,6481 | 16,5064 | 18,6053 | 18,7845 | 18,0092 | 26,9587 | 16,1868 |
| 2162 | 16,701 | 16,7146 | 13,6792 | 15,5737 | 13,6396 | 16,4976 | 18,5872 | 18,7683 | 17,9889 | 26,9248 | 16,1771 |
| 2628 | 16,6799 | 16,6958 | 13,6671 | 15,5572 | 13,6229 | 16,4763 | 18,5586 | 18,7452 | 17,9651 | 26,8846 | 16,1596 |
| 3195 | 16,6614 | 16,6774 | 13,649 | 15,5394 | 13,6068 | 16,4542 | 18,5275 | 18,7203 | 17,9381 | 26,8422 | 16,1391 |
| 3883 | 16,6397 | 16,654 | 13,6324 | 15,519 | 13,5891 | 16,4313 | 18,4968 | 18,6928 | 17,9109 | 26,8021 | 16,1194 |
| 4720 | 16,6216 | 16,6378 | 13,6186 | 15,5059 | 13,5752 | 16,4153 | 18,4703 | 18,6718 | 17,8888 | 26,7653 | 16,1 |
| 5737 | 16,6008 | 16,6173 | 13,6013 | 15,4851 | 13,5563 | 16,3936 | 18,4402 | 18,6466 | 17,862 | 26,7268 | 16,0771 |
| 6973 | 16,5791 | 16,5967 | 13,5848 | 15,4662 | 13,5387 | 16,3715 | 18,4119 | 18,6215 | 17,8369 | 26,6877 | 16,0591 |
| 8475 | 16,5596 | 16,5773 | 13,5683 | 15,4485 | 13,5239 | 16,3494 | 18,3826 | 18,5962 | 17,8124 | 26,648 | 16,0384 |
| 10301 | 16,5364 | 16,5539 | 13,5489 | 15,4278 | 13,5045 | 16,326 | 18,3531 | 18,5686 | 17,7859 | 26,6069 | 16,0159 |
| 12521 | 16,5142 | 16,53 | 13,5312 | 15,4069 | 13,4858 | 16,3014 | 18,3238 | 18,5407 | 17,7603 | 26,5638 | 15,9922 |
| 15219 | 16,492 | 16,5082 | 13,5132 | 15,3868 | 13,468 | 16,2784 | 18,2952 | 18,513 | 17,7348 | 26,5217 | 15,9703 |
| 18498 | 16,4682 | 16,4843 | 13,4936 | 15,3654 | 13,4492 | 16,2534 | 18,2656 | 18,4838 | 17,7078 | 26,4775 | 15,9463 |
| 22484 | 16,4445 | 16,4604 | 13,4745 | 15,3435 | 13,4304 | 16,2284 | 18,2364 | 18,4541 | 17,6821 | 26,4325 | 15,9228 |
| 27329 | 16,4206 | 16,436 | 13,455 | 15,322 | 13,4113 | 16,2027 | 18,2074 | 18,4234 | 17,6555 | 26,3859 | 15,8991 |
| 33218 | 16,3957 | 16,4107 | 13,4351 | 15,2988 | 13,3919 | 16,1757 | 18,178 | 18,3912 | 17,6284 | 26,337 | 15,8751 |
| 40375 | 16,3697 | 16,384 | 13,414 | 15,2749 | 13,3721 | 16,1479 | 18,1478 | 18,3576 | 17,601 | 26,2859 | 15,8493 |
| 49075 | 16,3436 | 16,3573 | 13,3928 | 15,2505 | 13,3516 | 16,1187 | 18,1177 | 18,3231 | 17,5734 | 26,2319 | 15,8232 |
| 59649 | 16,3164 | 16,3291 | 13,3708 | 15,2251 | 13,3315 | 16,0889 | 18,0874 | 18,2866 | 17,5452 | 26,1754 | 15,7969 |
| 72502 | 16,2881 | 16,2995 | 13,348 | 15,1982 | 13,3103 | 16,0567 | 18,0557 | 18,2472 | 17,5164 | 26,1148 | 15,7687 |
| 88125 | 16,2581 | 16,2681 | 13,3243 | 15,1696 | 13,2881 | 16,0236 | 18,0239 | 18,2067 | 17,4868 | 26,0513 | 15,7393 |
| 107113 | 16,2273 | 16,2354 | 13,2998 | 15,1402 | 13,2654 | 15,9879 | 17,9913 | 18,1629 | 17,4563 | 25,9834 | 15,71 |
| 130194 | 16,195 | 16,2018 | 13,2742 | 15,1089 | 13,2423 | 15,9515 | 17,9577 | 18,1174 | 17,4255 | 25,9108 | 15,6786 |
| 158247 | 16,162 | 16,1664 | 13,2482 | 15,0762 | 13,2187 | 15,9129 | 17,9235 | 18,069 | 17,3938 | 25,8331 | 15,6462 |
| 192345 | 16,1277 | 16,1293 | 13,2214 | 15,0421 | 13,1943 | 15,8722 | 17,8892 | 18,0178 | 17,3614 | 25,7499 | 15,6126 |
| 233790 | 16,0925 | 16,0908 | 13,1934 | 15,0062 | 13,1695 | 15,8296 | 17,8527 | 17,9628 | 17,3275 | 25,6611 | 15,5784 |
| 284166 | 16,0549 | 16,0497 | 13,1648 | 14,968 | 13,1435 | 15,7843 | 17,8146 | 17,9039 | 17,2924 | 25,5656 | 15,542 |
| 345397 | 16,016 | 16,0071 | 13,1345 | 14,9269 | 13,1161 | 15,736 | 17,7755 | 17,8412 | 17,2565 | 25,4633 | 15,5041 |
| 419821 | 15,9761 | 15,9624 | 13,1034 | 14,8844 | 13,0875 | 15,685 | 17,7353 | 17,775 | 17,2186 | 25,3523 | 15,4647 |
| 510281 | 15,9342 | 15,9153 | 13,0704 | 14,8393 | 13,0579 | 15,6308 | 17,6928 | 17,7035 | 17,1791 | 25,2318 | 15,4244 |
| 620234 | 15,8902 | 15,8656 | 13,0359 | 14,7912 | 13,0262 | 15,5721 | 17,6478 | 17,6261 | 17,1364 | 25,0997 | 15,3814 |
| 753878 | 15,8416 | 15,8107 | 12,9983 | 14,738 | 12,9915 | 15,5082 | 17,598 | 17,5406 | 17,0903 | 24,9533 | 15,3348 |
| 916320 | 15,7893 | 15,7514 | 12,957 | 14,6791 | 12,9528 | 15,4373 | 17,5433 | 17,4464 | 17,0373 | 24,7905 | 15,2837 |
| 1113763 | 15,7298 | 15,6838 | 12,9094 | 14,6125 | 12,908 | 15,3571 | 17,4798 | 17,3405 | 16,9774 | 24,607 | 15,2261 |
| 1353750 | 15,6614 | 15,6066 | 12,8548 | 14,5359 | 12,8561 | 15,2653 | 17,4058 | 17,2198 | 16,9072 | 24,398 | 15,1594 |
| 1645448 | 15,5794 | 15,5153 | 12,789 | 14,4455 | 12,7929 | 15,1584 | 17,3168 | 17,0802 | 16,8214 | 24,157 | 15,0804 |
| 2000000 | 15,4751 | 15,4009 | 12,7046 | 14,3328 | 12,7103 | 15,0257 | 17,2022 | 16,9114 | 16,7115 | 23,8686 | 14,9793 |

Frekvenční závislost ztrátového činitele

| F [Hz] | tg δ [-] | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 01SP | 01OP | 03OS | 03OP | 05SP | 05OP | 07SP | 07OP | 10SP | 10OP | PR 108 |
| 991 | 0,00763 | 0,00737 | 0,00713 | 0,00769 | 0,0086 | 0,00911 | 0,01146 | 0,01039 | 0,01131 | 0,01416 | 0,00777 |
| 1204 | 0,00813 | 0,008 | 0,00814 | 0,0083 | 0,00877 | 0,00946 | 0,01223 | 0,01076 | 0,01167 | 0,01432 | 0,00827 |
| 1464 | 0,00854 | 0,00816 | 0,00826 | 0,0086 | 0,0091 | 0,00938 | 0,01208 | 0,0107 | 0,01193 | 0,01378 | 0,00822 |
| 1779 | 0,00855 | 0,00851 | 0,00835 | 0,00872 | 0,00932 | 0,00944 | 0,01221 | 0,01069 | 0,01151 | 0,01338 | 0,00859 |
| 2162 | 0,00883 | 0,00866 | 0,00875 | 0,00895 | 0,00955 | 0,00983 | 0,01234 | 0,01081 | 0,01156 | 0,01299 | 0,0092 |
| 2628 | 0,00913 | 0,00902 | 0,00883 | 0,00917 | 0,0093 | 0,01001 | 0,01244 | 0,01082 | 0,01147 | 0,01289 | 0,00925 |
| 3195 | 0,0093 | 0,00929 | 0,00904 | 0,00929 | 0,00954 | 0,01026 | 0,01235 | 0,01111 | 0,01144 | 0,01277 | 0,00945 |
| 3883 | 0,00954 | 0,00958 | 0,00917 | 0,00942 | 0,0098 | 0,01041 | 0,0125 | 0,01115 | 0,01141 | 0,01274 | 0,00979 |
| 4720 | 0,00987 | 0,00981 | 0,00946 | 0,00982 | 0,01004 | 0,01068 | 0,01261 | 0,01153 | 0,01147 | 0,0127 | 0,01019 |
| 5737 | 0,01007 | 0,0101 | 0,00973 | 0,01004 | 0,01012 | 0,01086 | 0,0126 | 0,01163 | 0,01153 | 0,0128 | 0,01035 |
| 6973 | 0,01032 | 0,01039 | 0,00997 | 0,01021 | 0,01034 | 0,01118 | 0,0127 | 0,01191 | 0,01155 | 0,01293 | 0,01062 |
| 8475 | 0,01065 | 0,01074 | 0,01022 | 0,0106 | 0,01057 | 0,0115 | 0,01283 | 0,01228 | 0,01165 | 0,01309 | 0,01086 |
| 10301 | 0,01096 | 0,01103 | 0,0104 | 0,01086 | 0,01073 | 0,01185 | 0,01287 | 0,01261 | 0,01172 | 0,01341 | 0,01125 |
| 12521 | 0,01118 | 0,01136 | 0,01061 | 0,01114 | 0,0109 | 0,01215 | 0,01295 | 0,01301 | 0,0118 | 0,01372 | 0,0115 |
| 15219 | 0,01144 | 0,01167 | 0,01089 | 0,01145 | 0,01101 | 0,01249 | 0,01303 | 0,0134 | 0,01189 | 0,01408 | 0,01177 |
| 18498 | 0,01174 | 0,01197 | 0,01116 | 0,01177 | 0,01121 | 0,01289 | 0,01311 | 0,01383 | 0,01203 | 0,01455 | 0,01202 |
| 22484 | 0,01203 | 0,01234 | 0,01142 | 0,01216 | 0,01147 | 0,01333 | 0,01323 | 0,01439 | 0,01215 | 0,01512 | 0,01232 |
| 27329 | 0,0124 | 0,01274 | 0,01175 | 0,01257 | 0,01169 | 0,01382 | 0,01339 | 0,01499 | 0,01233 | 0,01576 | 0,01266 |
| 33218 | 0,01277 | 0,01319 | 0,01209 | 0,01303 | 0,01194 | 0,01436 | 0,01354 | 0,01565 | 0,01251 | 0,01649 | 0,01299 |
| 40375 | 0,01314 | 0,01365 | 0,01242 | 0,01352 | 0,01218 | 0,01493 | 0,01374 | 0,01638 | 0,01271 | 0,01734 | 0,01336 |
| 49075 | 0,01357 | 0,01418 | 0,0128 | 0,01409 | 0,01248 | 0,01558 | 0,01395 | 0,01719 | 0,01295 | 0,01827 | 0,01377 |
| 59649 | 0,01402 | 0,01473 | 0,01319 | 0,01469 | 0,01279 | 0,01629 | 0,01419 | 0,01808 | 0,01322 | 0,01931 | 0,01421 |
| 72502 | 0,01448 | 0,01533 | 0,01359 | 0,01534 | 0,01311 | 0,01705 | 0,01446 | 0,01905 | 0,0135 | 0,02047 | 0,01465 |
| 88125 | 0,01495 | 0,01593 | 0,014 | 0,01602 | 0,01344 | 0,01785 | 0,01472 | 0,02009 | 0,01379 | 0,02173 | 0,01511 |
| 107113 | 0,01543 | 0,01656 | 0,01441 | 0,01673 | 0,01377 | 0,01871 | 0,01504 | 0,0212 | 0,0141 | 0,02313 | 0,01558 |
| 130194 | 0,01592 | 0,01721 | 0,01483 | 0,01748 | 0,01412 | 0,0196 | 0,01537 | 0,02241 | 0,01445 | 0,02466 | 0,01604 |
| 158247 | 0,01639 | 0,01788 | 0,01526 | 0,01827 | 0,01447 | 0,02057 | 0,01571 | 0,02368 | 0,01481 | 0,0263 | 0,0165 |
| 192345 | 0,01686 | 0,01853 | 0,01565 | 0,01908 | 0,01482 | 0,02158 | 0,01605 | 0,02505 | 0,01518 | 0,0281 | 0,01695 |
| 233790 | 0,01732 | 0,01922 | 0,01606 | 0,01993 | 0,0152 | 0,02266 | 0,01644 | 0,02653 | 0,01556 | 0,03009 | 0,01741 |
| 284166 | 0,01775 | 0,01987 | 0,01648 | 0,02083 | 0,01558 | 0,02378 | 0,01683 | 0,02805 | 0,01598 | 0,03221 | 0,01783 |
| 345397 | 0,01815 | 0,02054 | 0,01683 | 0,02168 | 0,01594 | 0,02498 | 0,01724 | 0,02972 | 0,01643 | 0,03453 | 0,01819 |
| 419821 | 0,01856 | 0,02122 | 0,01722 | 0,02263 | 0,01632 | 0,02623 | 0,01768 | 0,03149 | 0,01691 | 0,03704 | 0,01856 |
| 510281 | 0,01895 | 0,02189 | 0,01758 | 0,02359 | 0,01674 | 0,02756 | 0,01816 | 0,03337 | 0,01743 | 0,0398 | 0,01892 |
| 620234 | 0,01934 | 0,02255 | 0,01797 | 0,02462 | 0,01717 | 0,02899 | 0,01868 | 0,03538 | 0,01799 | 0,04276 | 0,01925 |
| 753878 | 0,0197 | 0,02324 | 0,01835 | 0,02568 | 0,0176 | 0,03048 | 0,01921 | 0,03749 | 0,01864 | 0,04598 | 0,01958 |
| 916320 | 0,02009 | 0,02394 | 0,0188 | 0,0268 | 0,0181 | 0,03211 | 0,01989 | 0,03981 | 0,01932 | 0,04936 | 0,01989 |
| 1113763 | 0,02049 | 0,02468 | 0,01922 | 0,02799 | 0,01864 | 0,03387 | 0,02052 | 0,0422 | 0,02011 | 0,05302 | 0,02029 |
| 1353750 | 0,0209 | 0,02543 | 0,01975 | 0,02924 | 0,01931 | 0,03572 | 0,0213 | 0,04478 | 0,02097 | 0,05702 | 0,02061 |
| 1645448 | 0,02124 | 0,02604 | 0,02018 | 0,03044 | 0,01986 | 0,03753 | 0,02205 | 0,04736 | 0,02184 | 0,06111 | 0,02081 |
| 2000000 | 0,02156 | 0,02668 | 0,02062 | 0,03174 | 0,02048 | 0,0395 | 0,02286 | 0,05014 | 0,02283 | 0,06534 | 0,02105 |

Frekvenční závislost relativní permitivity

| F [Hz] | $\epsilon_r [-]$ | | | | | | | | | | |
|---------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 01SP | 01OP | 03OS | 03OP | 05SP | 05OP | 07SP | 07OP | 10SP | 10OP | PR 108 |
| 991 | 2,65574 | 2,55392 | 2,27987 | 2,60358 | 2,30793 | 2,85125 | 3,0673 | 3,46283 | 3,20262 | 4,51685 | 2,71166 |
| 1204 | 2,65557 | 2,55336 | 2,27943 | 2,60357 | 2,3072 | 2,85054 | 3,06458 | 3,46115 | 3,20159 | 4,51127 | 2,71138 |
| 1464 | 2,65323 | 2,55048 | 2,27634 | 2,60036 | 2,30454 | 2,84628 | 3,06053 | 3,4567 | 3,19662 | 4,50478 | 2,70843 |
| 1779 | 2,64959 | 2,54764 | 2,2733 | 2,59638 | 2,30047 | 2,84207 | 3,0549 | 3,45141 | 3,19089 | 4,4968 | 2,70487 |
| 2162 | 2,6482 | 2,54577 | 2,27133 | 2,59498 | 2,29904 | 2,84057 | 3,05194 | 3,44844 | 3,18735 | 4,49114 | 2,70325 |
| 2628 | 2,64485 | 2,54291 | 2,26931 | 2,59223 | 2,29623 | 2,83689 | 3,04726 | 3,44418 | 3,18317 | 4,48441 | 2,70033 |
| 3195 | 2,64192 | 2,54009 | 2,26632 | 2,58927 | 2,29351 | 2,83309 | 3,04216 | 3,43961 | 3,17841 | 4,47732 | 2,6969 |
| 3883 | 2,63849 | 2,53653 | 2,26357 | 2,58588 | 2,29054 | 2,82916 | 3,03712 | 3,43455 | 3,17362 | 4,47062 | 2,69361 |
| 4720 | 2,63562 | 2,53407 | 2,2613 | 2,58369 | 2,28821 | 2,8264 | 3,03277 | 3,43069 | 3,16972 | 4,46447 | 2,69037 |
| 5737 | 2,63231 | 2,53094 | 2,25842 | 2,58023 | 2,28502 | 2,82268 | 3,02783 | 3,42606 | 3,165 | 4,45803 | 2,68654 |
| 6973 | 2,62888 | 2,52781 | 2,25569 | 2,57708 | 2,28205 | 2,81887 | 3,02319 | 3,42144 | 3,16059 | 4,45151 | 2,68354 |
| 8475 | 2,62579 | 2,52485 | 2,25297 | 2,57414 | 2,27956 | 2,81507 | 3,01839 | 3,41679 | 3,15629 | 4,44486 | 2,68008 |
| 10301 | 2,62211 | 2,52127 | 2,24974 | 2,57069 | 2,2763 | 2,81105 | 3,01354 | 3,41172 | 3,1516 | 4,438 | 2,67632 |
| 12521 | 2,61858 | 2,51764 | 2,24681 | 2,5672 | 2,27315 | 2,80681 | 3,00873 | 3,40658 | 3,1471 | 4,4308 | 2,67236 |
| 15219 | 2,61507 | 2,51432 | 2,24384 | 2,56385 | 2,27015 | 2,80285 | 3,00405 | 3,40149 | 3,1426 | 4,42376 | 2,6687 |
| 18498 | 2,6113 | 2,51068 | 2,24058 | 2,5603 | 2,267 | 2,79856 | 2,99919 | 3,39613 | 3,13784 | 4,41638 | 2,66469 |
| 22484 | 2,60754 | 2,50703 | 2,23743 | 2,55665 | 2,26382 | 2,79425 | 2,9944 | 3,39067 | 3,13331 | 4,40885 | 2,66076 |
| 27329 | 2,60375 | 2,50331 | 2,2342 | 2,55306 | 2,26061 | 2,78983 | 2,98964 | 3,38501 | 3,12863 | 4,40106 | 2,6568 |
| 33218 | 2,5998 | 2,49945 | 2,23089 | 2,54919 | 2,25735 | 2,78519 | 2,98482 | 3,3791 | 3,12385 | 4,39288 | 2,65279 |
| 40375 | 2,59568 | 2,49539 | 2,22741 | 2,54522 | 2,25401 | 2,7804 | 2,97986 | 3,37292 | 3,11903 | 4,38435 | 2,64848 |
| 49075 | 2,59155 | 2,49131 | 2,22389 | 2,54115 | 2,25056 | 2,77538 | 2,97493 | 3,36658 | 3,11416 | 4,37532 | 2,64412 |
| 59649 | 2,58724 | 2,48701 | 2,22025 | 2,53692 | 2,24717 | 2,77026 | 2,96996 | 3,35987 | 3,10918 | 4,36587 | 2,63972 |
| 72502 | 2,58275 | 2,48251 | 2,21648 | 2,53243 | 2,2436 | 2,76472 | 2,96475 | 3,35263 | 3,10411 | 4,35575 | 2,63501 |
| 88125 | 2,578 | 2,47772 | 2,21254 | 2,52767 | 2,23987 | 2,75902 | 2,95953 | 3,34518 | 3,09889 | 4,34513 | 2,6301 |
| 107113 | 2,57311 | 2,47273 | 2,20848 | 2,52278 | 2,23605 | 2,75288 | 2,95419 | 3,33714 | 3,09351 | 4,33378 | 2,6252 |
| 130194 | 2,568 | 2,46761 | 2,20425 | 2,51756 | 2,23216 | 2,74661 | 2,94867 | 3,32876 | 3,08808 | 4,32164 | 2,61995 |
| 158247 | 2,56276 | 2,46222 | 2,19994 | 2,5121 | 2,22818 | 2,73998 | 2,94306 | 3,31987 | 3,0825 | 4,30867 | 2,61454 |
| 192345 | 2,55734 | 2,45657 | 2,1955 | 2,50642 | 2,22408 | 2,73297 | 2,93743 | 3,31046 | 3,07678 | 4,29475 | 2,60892 |
| 233790 | 2,55175 | 2,4507 | 2,19087 | 2,50044 | 2,21989 | 2,72564 | 2,93145 | 3,30035 | 3,0708 | 4,27992 | 2,60321 |
| 284166 | 2,5458 | 2,44444 | 2,18613 | 2,49407 | 2,21552 | 2,71784 | 2,92521 | 3,28952 | 3,06462 | 4,26395 | 2,59713 |
| 345397 | 2,53963 | 2,43794 | 2,18111 | 2,48723 | 2,2109 | 2,70953 | 2,91878 | 3,27801 | 3,05828 | 4,24685 | 2,59079 |
| 419821 | 2,53331 | 2,43113 | 2,17596 | 2,48015 | 2,20609 | 2,70076 | 2,91219 | 3,26584 | 3,05159 | 4,22831 | 2,58421 |
| 510281 | 2,52667 | 2,42396 | 2,17049 | 2,47262 | 2,2011 | 2,69144 | 2,90522 | 3,25269 | 3,04462 | 4,20817 | 2,57747 |
| 620234 | 2,51969 | 2,41638 | 2,16476 | 2,46462 | 2,19576 | 2,68134 | 2,89784 | 3,23846 | 3,03707 | 4,18609 | 2,57029 |
| 753878 | 2,51198 | 2,40801 | 2,15853 | 2,45574 | 2,18992 | 2,67034 | 2,88967 | 3,22275 | 3,02893 | 4,16164 | 2,5625 |
| 916320 | 2,5037 | 2,39898 | 2,15168 | 2,44592 | 2,18339 | 2,65813 | 2,88069 | 3,20545 | 3,01958 | 4,13444 | 2,55396 |
| 1113763 | 2,49427 | 2,38868 | 2,14379 | 2,43483 | 2,17585 | 2,64433 | 2,87028 | 3,18598 | 3,00899 | 4,10378 | 2,54434 |
| 1353750 | 2,48343 | 2,37692 | 2,13474 | 2,42207 | 2,16709 | 2,62853 | 2,85815 | 3,16379 | 2,99658 | 4,06886 | 2,53319 |
| 1645448 | 2,47042 | 2,36301 | 2,12383 | 2,407 | 2,15645 | 2,61013 | 2,84353 | 3,13815 | 2,98141 | 4,02862 | 2,51999 |
| 2000000 | 2,45389 | 2,34558 | 2,10982 | 2,38821 | 2,14253 | 2,58729 | 2,82474 | 3,10713 | 2,96195 | 3,98046 | 2,5031 |

Příklad výpočtu pro vzorek 10OP při frekvenci 2 Mhz:

$$\epsilon = C \cdot \frac{d}{S} = 2,386 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{0,1667}{11,34} = 3,52 \cdot 10^{-13} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{3,52 \cdot 10^{-13}}{8,8541 \cdot 10^{-14}} = 3,98$$

Hodnoty pro Cole-Cole diagram vzorku s 10 hm.% PANI-CH₃COOH (100B)

| f [Hz] | C [F] | ϵ [F·cm ⁻¹] | ϵ_r [-] | tg δ [-] | δ [rad] | ϵ_r (Re) [-] | ϵ_r (Im) [-] |
|---------|----------|----------------------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 20 | 3,48E-11 | 5,18E-13 | 5,847882 | 0,02624 | 0,026234 | 5,84587 | 0,153395 |
| 24 | 3,5E-11 | 5,21E-13 | 5,888293 | 0,032771 | 0,03276 | 5,885134 | 0,192864 |
| 30 | 3,48E-11 | 5,18E-13 | 5,846016 | 0,070138 | 0,070024 | 5,831689 | 0,409025 |
| 36 | 3,45E-11 | 5,14E-13 | 5,805386 | -0,0188 | -0,0188 | 5,80436 | -0,10915 |
| 44 | 3,47E-11 | 5,16E-13 | 5,825962 | 0,047322 | 0,047287 | 5,819449 | 0,275389 |
| 53 | 3,42E-11 | 5,09E-13 | 5,745879 | 0,020562 | 0,020559 | 5,744665 | 0,118124 |
| 64 | 3,42E-11 | 5,09E-13 | 5,749073 | 0,052182 | 0,052135 | 5,741262 | 0,29959 |
| 78 | 3,39E-11 | 5,05E-13 | 5,69866 | 0,04237 | 0,042344 | 5,693552 | 0,241234 |
| 95 | 3,39E-11 | 5,04E-13 | 5,697366 | 0,027482 | 0,027475 | 5,695215 | 0,156517 |
| 116 | 3,42E-11 | 5,09E-13 | 5,75425 | 0,036638 | 0,036622 | 5,750392 | 0,210683 |
| 141 | 3,41E-11 | 5,07E-13 | 5,726968 | 0,026386 | 0,02638 | 5,724975 | 0,151058 |
| 171 | 3,4E-11 | 5,06E-13 | 5,713923 | 0,025182 | 0,025177 | 5,712113 | 0,143842 |
| 208 | 3,39E-11 | 5,05E-13 | 5,699551 | 0,024061 | 0,024056 | 5,697902 | 0,137095 |
| 253 | 3,38E-11 | 5,04E-13 | 5,690137 | 0,021897 | 0,021893 | 5,688774 | 0,124566 |
| 307 | 3,38E-11 | 5,02E-13 | 5,674252 | 0,021084 | 0,021081 | 5,672991 | 0,119608 |
| 373 | 3,37E-11 | 5,01E-13 | 5,662199 | 0,020184 | 0,020182 | 5,661046 | 0,114265 |
| 454 | 3,36E-11 | 5E-13 | 5,648886 | 0,019509 | 0,019507 | 5,647811 | 0,110184 |
| 552 | 3,35E-11 | 4,99E-13 | 5,636295 | 0,018457 | 0,018455 | 5,635335 | 0,104011 |
| 671 | 3,35E-11 | 4,98E-13 | 5,626932 | 0,01812 | 0,018118 | 5,626008 | 0,101943 |
| 815 | 3,34E-11 | 4,97E-13 | 5,613501 | 0,017533 | 0,017531 | 5,612638 | 0,098408 |
| 991 | 3,33E-11 | 4,96E-13 | 5,60323 | 0,016985 | 0,016983 | 5,602422 | 0,095154 |
| 1204 | 3,33E-11 | 4,95E-13 | 5,593799 | 0,016963 | 0,016962 | 5,592995 | 0,094876 |
| 1464 | 3,32E-11 | 4,94E-13 | 5,583915 | 0,016384 | 0,016382 | 5,583166 | 0,091474 |
| 1779 | 3,32E-11 | 4,93E-13 | 5,573426 | 0,015913 | 0,015911 | 5,57272 | 0,088676 |
| 2162 | 3,31E-11 | 4,93E-13 | 5,56534 | 0,01565 | 0,015649 | 5,564659 | 0,087088 |
| 2628 | 3,3E-11 | 4,92E-13 | 5,555456 | 0,015654 | 0,015653 | 5,554775 | 0,086954 |
| 3195 | 3,3E-11 | 4,91E-13 | 5,545168 | 0,015318 | 0,015317 | 5,544518 | 0,08493 |
| 3883 | 3,29E-11 | 4,9E-13 | 5,535889 | 0,01539 | 0,015389 | 5,535234 | 0,085189 |
| 4720 | 3,29E-11 | 4,89E-13 | 5,526845 | 0,015412 | 0,01541 | 5,526189 | 0,085167 |
| 5737 | 3,28E-11 | 4,89E-13 | 5,517432 | 0,01551 | 0,015508 | 5,516768 | 0,085562 |
| 6973 | 3,28E-11 | 4,88E-13 | 5,508052 | 0,015712 | 0,015711 | 5,507372 | 0,086531 |
| 8475 | 3,27E-11 | 4,87E-13 | 5,498521 | 0,015933 | 0,015932 | 5,497823 | 0,087597 |
| 10301 | 3,27E-11 | 4,86E-13 | 5,488687 | 0,016298 | 0,016296 | 5,487958 | 0,089442 |
| 12521 | 3,26E-11 | 4,85E-13 | 5,478315 | 0,016723 | 0,016721 | 5,477549 | 0,091601 |
| 15219 | 3,25E-11 | 4,84E-13 | 5,468263 | 0,01721 | 0,017209 | 5,467453 | 0,094096 |
| 18498 | 3,25E-11 | 4,83E-13 | 5,457639 | 0,017817 | 0,017815 | 5,456773 | 0,097222 |
| 22484 | 3,24E-11 | 4,82E-13 | 5,446763 | 0,018526 | 0,018524 | 5,445828 | 0,100888 |
| 27329 | 3,23E-11 | 4,81E-13 | 5,435567 | 0,019329 | 0,019326 | 5,434552 | 0,105043 |
| 33218 | 3,23E-11 | 4,8E-13 | 5,42375 | 0,020241 | 0,020238 | 5,422639 | 0,10976 |
| 40375 | 3,22E-11 | 4,79E-13 | 5,411479 | 0,021264 | 0,021261 | 5,410256 | 0,115044 |
| 49075 | 3,21E-11 | 4,78E-13 | 5,3984 | 0,022427 | 0,022423 | 5,397043 | 0,121038 |
| 59649 | 3,2E-11 | 4,77E-13 | 5,384801 | 0,02369 | 0,023685 | 5,383291 | 0,127529 |
| 72502 | 3,19E-11 | 4,75E-13 | 5,370177 | 0,025105 | 0,0251 | 5,368485 | 0,134775 |
| 88125 | 3,19E-11 | 4,74E-13 | 5,354812 | 0,02665 | 0,026644 | 5,352912 | 0,142656 |
| 107113 | 3,18E-11 | 4,73E-13 | 5,338591 | 0,028351 | 0,028343 | 5,336446 | 0,151291 |
| 130194 | 3,17E-11 | 4,71E-13 | 5,321058 | 0,030213 | 0,030203 | 5,318631 | 0,16069 |
| 158247 | 3,15E-11 | 4,69E-13 | 5,302315 | 0,032179 | 0,032168 | 5,299572 | 0,170533 |
| 192345 | 3,14E-11 | 4,68E-13 | 5,28226 | 0,034363 | 0,03435 | 5,279145 | 0,181408 |
| 233790 | 3,13E-11 | 4,66E-13 | 5,260996 | 0,036758 | 0,036742 | 5,257445 | 0,193254 |
| 284166 | 3,12E-11 | 4,64E-13 | 5,238319 | 0,039338 | 0,039317 | 5,234271 | 0,205903 |
| 345397 | 3,1E-11 | 4,62E-13 | 5,213978 | 0,042145 | 0,04212 | 5,209354 | 0,219548 |
| 419821 | 3,09E-11 | 4,59E-13 | 5,187435 | 0,045162 | 0,045131 | 5,182153 | 0,234036 |
| 510281 | 3,07E-11 | 4,57E-13 | 5,158842 | 0,048518 | 0,04848 | 5,15278 | 0,250003 |
| 620234 | 3,05E-11 | 4,54E-13 | 5,127558 | 0,052058 | 0,052011 | 5,120624 | 0,266571 |
| 753878 | 3,03E-11 | 4,51E-13 | 5,092964 | 0,055865 | 0,055807 | 5,085035 | 0,284076 |
| 916320 | 3,01E-11 | 4,48E-13 | 5,054906 | 0,059911 | 0,059839 | 5,045858 | 0,302301 |
| 1113763 | 2,98E-11 | 4,44E-13 | 5,012293 | 0,064296 | 0,064208 | 5,001964 | 0,321606 |
| 1353750 | 2,95E-11 | 4,4E-13 | 4,964082 | 0,069056 | 0,068946 | 4,952288 | 0,341985 |
| 1645448 | 2,92E-11 | 4,35E-13 | 4,908911 | 0,073975 | 0,07384 | 4,895535 | 0,362145 |
| 2000000 | 2,88E-11 | 4,29E-13 | 4,843739 | 0,078811 | 0,078648 | 4,828766 | 0,380558 |

Hodnoty pro Cole-Cole diagram vzorku s 5 hm.% PANI-CH₃COOH (050B)

| f [Hz] | C [F] | ϵ [F·cm ⁻¹] | ϵ_r [-] | tg δ [-] | δ [rad] | ϵ_r {Re} [-] | ϵ_r {Im} [-] |
|---------|----------|----------------------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 20 | 1,85E-11 | 2,8E-13 | 3,159959 | 0,017159 | 0,017158 | 3,159494 | 0,054215 |
| 24 | 1,97E-11 | 2,97E-13 | 3,358936 | 0,013357 | 0,013356 | 3,358637 | 0,04486 |
| 30 | 1,94E-11 | 2,94E-13 | 3,320341 | 0,018567 | 0,018564 | 3,319769 | 0,061637 |
| 36 | 1,95E-11 | 2,94E-13 | 3,325571 | 0,040611 | 0,040589 | 3,322832 | 0,134944 |
| 44 | 1,97E-11 | 2,98E-13 | 3,370269 | -0,04603 | -0,046 | 3,366704 | -0,15497 |
| 53 | 1,94E-11 | 2,93E-13 | 3,312615 | 0,007836 | 0,007836 | 3,312513 | 0,025958 |
| 64 | 2,03E-11 | 3,07E-13 | 3,468433 | 0,035272 | 0,035257 | 3,466277 | 0,122262 |
| 78 | 2,01E-11 | 3,05E-13 | 3,441426 | -0,05208 | -0,05204 | 3,436768 | -0,179 |
| 95 | 1,94E-11 | 2,94E-13 | 3,319743 | -0,01046 | -0,01046 | 3,319561 | -0,03471 |
| 116 | 1,97E-11 | 2,98E-13 | 3,360902 | 0,005661 | 0,00566 | 3,360848 | 0,019024 |
| 141 | 1,96E-11 | 2,96E-13 | 3,347809 | 0,010872 | 0,010872 | 3,347611 | 0,036396 |
| 171 | 1,96E-11 | 2,97E-13 | 3,356492 | 0,010055 | 0,010054 | 3,356322 | 0,033747 |
| 208 | 1,96E-11 | 2,97E-13 | 3,350783 | 0,010213 | 0,010212 | 3,350608 | 0,034218 |
| 253 | 1,96E-11 | 2,96E-13 | 3,346066 | 0,009546 | 0,009546 | 3,345913 | 0,03194 |
| 307 | 1,96E-11 | 2,96E-13 | 3,34639 | 0,010252 | 0,010252 | 3,346214 | 0,034305 |
| 373 | 1,96E-11 | 2,96E-13 | 3,341758 | 0,009855 | 0,009855 | 3,341596 | 0,032932 |
| 454 | 1,95E-11 | 2,95E-13 | 3,337246 | 0,008956 | 0,008956 | 3,337112 | 0,029889 |
| 552 | 1,95E-11 | 2,95E-13 | 3,335041 | 0,010232 | 0,010231 | 3,334866 | 0,034121 |
| 671 | 1,95E-11 | 2,95E-13 | 3,33075 | 0,009832 | 0,009832 | 3,330589 | 0,032747 |
| 815 | 1,95E-11 | 2,94E-13 | 3,325366 | 0,009956 | 0,009956 | 3,325201 | 0,033105 |
| 991 | 1,94E-11 | 2,94E-13 | 3,318341 | 0,010093 | 0,010093 | 3,318172 | 0,03349 |
| 1204 | 1,94E-11 | 2,94E-13 | 3,317093 | 0,010701 | 0,0107 | 3,316903 | 0,035493 |
| 1464 | 1,94E-11 | 2,93E-13 | 3,31347 | 0,010306 | 0,010306 | 3,313294 | 0,034147 |
| 1779 | 1,94E-11 | 2,93E-13 | 3,308222 | 0,010413 | 0,010413 | 3,308043 | 0,034447 |
| 2162 | 1,93E-11 | 2,93E-13 | 3,305778 | 0,011029 | 0,011028 | 3,305577 | 0,036456 |
| 2628 | 1,93E-11 | 2,92E-13 | 3,301368 | 0,011137 | 0,011137 | 3,301163 | 0,036766 |
| 3195 | 1,93E-11 | 2,92E-13 | 3,296599 | 0,011414 | 0,011414 | 3,296384 | 0,037626 |
| 3883 | 1,93E-11 | 2,91E-13 | 3,291574 | 0,011399 | 0,011398 | 3,29136 | 0,037517 |
| 4720 | 1,92E-11 | 2,91E-13 | 3,287608 | 0,011691 | 0,01169 | 3,287384 | 0,038432 |
| 5737 | 1,92E-11 | 2,91E-13 | 3,283198 | 0,011979 | 0,011979 | 3,282963 | 0,039328 |
| 6973 | 1,92E-11 | 2,9E-13 | 3,278498 | 0,012316 | 0,012315 | 3,278249 | 0,040375 |
| 8475 | 1,92E-11 | 2,9E-13 | 3,273438 | 0,012682 | 0,012682 | 3,273175 | 0,041512 |
| 10301 | 1,91E-11 | 2,89E-13 | 3,268533 | 0,013018 | 0,013017 | 3,268256 | 0,042545 |
| 12521 | 1,91E-11 | 2,89E-13 | 3,263234 | 0,013365 | 0,013364 | 3,262943 | 0,043608 |
| 15219 | 1,91E-11 | 2,88E-13 | 3,258192 | 0,013754 | 0,013753 | 3,257883 | 0,044808 |
| 18498 | 1,9E-11 | 2,88E-13 | 3,25279 | 0,014198 | 0,014197 | 3,252462 | 0,046177 |
| 22484 | 1,9E-11 | 2,88E-13 | 3,247406 | 0,014672 | 0,014671 | 3,247056 | 0,047641 |
| 27329 | 1,9E-11 | 2,87E-13 | 3,241817 | 0,015231 | 0,01523 | 3,241441 | 0,049371 |
| 33218 | 1,89E-11 | 2,87E-13 | 3,235988 | 0,015809 | 0,015807 | 3,235584 | 0,05115 |
| 40375 | 1,89E-11 | 2,86E-13 | 3,229937 | 0,016437 | 0,016435 | 3,229501 | 0,053083 |
| 49075 | 1,89E-11 | 2,85E-13 | 3,223613 | 0,017149 | 0,017147 | 3,223139 | 0,055273 |
| 59649 | 1,88E-11 | 2,85E-13 | 3,217118 | 0,01792 | 0,017918 | 3,216601 | 0,057641 |
| 72502 | 1,88E-11 | 2,84E-13 | 3,21011 | 0,018735 | 0,018732 | 3,209546 | 0,06013 |
| 88125 | 1,87E-11 | 2,84E-13 | 3,202965 | 0,019597 | 0,019595 | 3,20235 | 0,062757 |
| 107113 | 1,87E-11 | 2,83E-13 | 3,195256 | 0,020526 | 0,020524 | 3,194583 | 0,065573 |
| 130194 | 1,86E-11 | 2,82E-13 | 3,187325 | 0,021489 | 0,021486 | 3,186589 | 0,068478 |
| 158247 | 1,86E-11 | 2,81E-13 | 3,179086 | 0,022529 | 0,022525 | 3,17828 | 0,071603 |
| 192345 | 1,85E-11 | 2,81E-13 | 3,170318 | 0,023613 | 0,023609 | 3,169434 | 0,07484 |
| 233790 | 1,85E-11 | 2,8E-13 | 3,161053 | 0,024771 | 0,024766 | 3,160084 | 0,078277 |
| 284166 | 1,84E-11 | 2,79E-13 | 3,151327 | 0,025953 | 0,025947 | 3,150267 | 0,08176 |
| 345397 | 1,84E-11 | 2,78E-13 | 3,140918 | 0,02725 | 0,027244 | 3,139752 | 0,085559 |
| 419821 | 1,83E-11 | 2,77E-13 | 3,130167 | 0,028605 | 0,028597 | 3,128887 | 0,089501 |
| 510281 | 1,82E-11 | 2,76E-13 | 3,118595 | 0,030033 | 0,030024 | 3,117189 | 0,093619 |
| 620234 | 1,82E-11 | 2,75E-13 | 3,106117 | 0,031579 | 0,031568 | 3,104569 | 0,098039 |
| 753878 | 1,81E-11 | 2,74E-13 | 3,092562 | 0,033186 | 0,033174 | 3,090861 | 0,102574 |
| 916320 | 1,8E-11 | 2,73E-13 | 3,077675 | 0,034966 | 0,034952 | 3,075795 | 0,107549 |
| 1113763 | 1,79E-11 | 2,71E-13 | 3,06089 | 0,036835 | 0,036818 | 3,058815 | 0,112671 |
| 1353750 | 1,78E-11 | 2,69E-13 | 3,041711 | 0,038864 | 0,038844 | 3,039417 | 0,118124 |
| 1645448 | 1,77E-11 | 2,67E-13 | 3,019593 | 0,040846 | 0,040823 | 3,017078 | 0,123236 |
| 2000000 | 1,75E-11 | 2,65E-13 | 2,992262 | 0,043042 | 0,043016 | 2,989494 | 0,128675 |

Hodnoty pro Cole-Cole diagram vzorku s 0 hm.% PANI-CH₃COOH (LETOXIT PR 108)

| f [Hz] | C [F] | ϵ [F·cm ⁻¹] | ϵ_r [-] | tg δ [-] | δ [rad] | ϵ_r {Re} [-] | ϵ_r {Im} [-] |
|---------|----------|----------------------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 20 | 1,63E-11 | 2,61E-13 | 2,949779 | 0,026081 | 0,026075 | 2,948777 | 0,076907 |
| 24 | 1,63E-11 | 2,61E-13 | 2,952045 | 0,043015 | 0,042989 | 2,949318 | 0,126865 |
| 30 | 1,6E-11 | 2,56E-13 | 2,893074 | 0,04314 | 0,043113 | 2,890386 | 0,12469 |
| 36 | 1,59E-11 | 2,55E-13 | 2,874571 | -0,03368 | -0,03367 | 2,872942 | -0,09677 |
| 44 | 1,62E-11 | 2,6E-13 | 2,933596 | 0,058413 | 0,058346 | 2,928604 | 0,171068 |
| 53 | 1,68E-11 | 2,69E-13 | 3,042875 | 0,003632 | 0,003632 | 3,042855 | 0,011052 |
| 64 | 1,6E-11 | 2,56E-13 | 2,893074 | -0,00945 | -0,00945 | 2,892945 | -0,02734 |
| 78 | 1,61E-11 | 2,59E-13 | 2,925079 | -0,04472 | -0,04469 | 2,922158 | -0,13068 |
| 95 | 1,58E-11 | 2,53E-13 | 2,854709 | 0,052532 | 0,052484 | 2,850778 | 0,149757 |
| 116 | 1,65E-11 | 2,65E-13 | 2,989033 | 0,017095 | 0,017093 | 2,988596 | 0,051089 |
| 141 | 1,63E-11 | 2,62E-13 | 2,959747 | 0,00567 | 0,00567 | 2,959699 | 0,016782 |
| 171 | 1,63E-11 | 2,62E-13 | 2,961758 | 0,007322 | 0,007322 | 2,961679 | 0,021685 |
| 208 | 1,63E-11 | 2,62E-13 | 2,954183 | 0,004986 | 0,004986 | 2,954147 | 0,01473 |
| 253 | 1,63E-11 | 2,62E-13 | 2,955325 | 0,005248 | 0,005248 | 2,955284 | 0,01551 |
| 307 | 1,63E-11 | 2,61E-13 | 2,949363 | 0,005046 | 0,005046 | 2,949325 | 0,014883 |
| 373 | 1,63E-11 | 2,62E-13 | 2,955307 | 0,006077 | 0,006077 | 2,955252 | 0,017959 |
| 454 | 1,63E-11 | 2,61E-13 | 2,953205 | 0,006147 | 0,006147 | 2,953149 | 0,018154 |
| 552 | 1,63E-11 | 2,61E-13 | 2,950831 | 0,006127 | 0,006127 | 2,950775 | 0,018079 |
| 671 | 1,63E-11 | 2,61E-13 | 2,951392 | 0,00714 | 0,00714 | 2,951317 | 0,021073 |
| 815 | 1,63E-11 | 2,61E-13 | 2,945158 | 0,007472 | 0,007472 | 2,945076 | 0,022006 |
| 991 | 1,62E-11 | 2,6E-13 | 2,940809 | 0,007768 | 0,007768 | 2,94072 | 0,022845 |
| 1204 | 1,62E-11 | 2,6E-13 | 2,940501 | 0,008271 | 0,00827 | 2,9404 | 0,024319 |
| 1464 | 1,62E-11 | 2,6E-13 | 2,937311 | 0,008222 | 0,008222 | 2,937212 | 0,02415 |
| 1779 | 1,62E-11 | 2,6E-13 | 2,933451 | 0,008593 | 0,008593 | 2,933343 | 0,025206 |
| 2162 | 1,62E-11 | 2,6E-13 | 2,931693 | 0,009196 | 0,009196 | 2,931569 | 0,026958 |
| 2628 | 1,62E-11 | 2,59E-13 | 2,928522 | 0,00925 | 0,00925 | 2,928397 | 0,027089 |
| 3195 | 1,6E-11 | 2,59E-13 | 2,924807 | 0,00945 | 0,009449 | 2,924676 | 0,027637 |
| 3883 | 1,6E-11 | 2,59E-13 | 2,921237 | 0,00979 | 0,009788 | 2,921097 | 0,028594 |
| 4720 | 1,6E-11 | 2,58E-13 | 2,917721 | 0,01019 | 0,010187 | 2,917569 | 0,029723 |
| 5737 | 1,6E-11 | 2,58E-13 | 2,913571 | 0,01035 | 0,01035 | 2,913415 | 0,030155 |
| 6973 | 1,6E-11 | 2,58E-13 | 2,910309 | 0,01062 | 0,010624 | 2,910144 | 0,030919 |
| 8475 | 1,6E-11 | 2,57E-13 | 2,906557 | 0,01086 | 0,010861 | 2,906386 | 0,031566 |
| 10301 | 1,6E-11 | 2,57E-13 | 2,90248 | 0,01125 | 0,011251 | 2,902296 | 0,032656 |
| 12521 | 1,6E-11 | 2,57E-13 | 2,898185 | 0,0115 | 0,011495 | 2,897993 | 0,033314 |
| 15219 | 1,6E-11 | 2,56E-13 | 2,894216 | 0,01177 | 0,011771 | 2,894015 | 0,034067 |
| 18498 | 1,6E-11 | 2,56E-13 | 2,889867 | 0,01202 | 0,012022 | 2,889658 | 0,034742 |
| 22484 | 1,6E-11 | 2,55E-13 | 2,885608 | 0,01232 | 0,012321 | 2,885389 | 0,035552 |
| 27329 | 1,6E-11 | 2,55E-13 | 2,881313 | 0,01266 | 0,012664 | 2,881082 | 0,036489 |
| 33218 | 1,6E-11 | 2,55E-13 | 2,876963 | 0,01299 | 0,012989 | 2,876721 | 0,037367 |
| 40375 | 1,6E-11 | 2,54E-13 | 2,872288 | 0,01336 | 0,013364 | 2,872031 | 0,038383 |
| 49075 | 1,6E-11 | 2,54E-13 | 2,867558 | 0,01377 | 0,013774 | 2,867286 | 0,039497 |
| 59649 | 1,6E-11 | 2,53E-13 | 2,862792 | 0,01421 | 0,014206 | 2,862503 | 0,040666 |
| 72502 | 1,6E-11 | 2,53E-13 | 2,857681 | 0,01465 | 0,014652 | 2,857374 | 0,04187 |
| 88125 | 1,6E-11 | 2,53E-13 | 2,852353 | 0,01511 | 0,015111 | 2,852027 | 0,043099 |
| 107113 | 1,6E-11 | 2,52E-13 | 2,847043 | 0,01558 | 0,015579 | 2,846698 | 0,044352 |
| 130194 | 1,6E-11 | 2,52E-13 | 2,841353 | 0,01604 | 0,016036 | 2,840987 | 0,045562 |
| 158247 | 1,6E-11 | 2,51E-13 | 2,835481 | 0,0165 | 0,0165 | 2,835095 | 0,046782 |
| 192345 | 1,6E-11 | 2,51E-13 | 2,829392 | 0,01695 | 0,016948 | 2,828985 | 0,04795 |
| 233790 | 1,6E-11 | 2,5E-13 | 2,823194 | 0,01741 | 0,017406 | 2,822766 | 0,049138 |
| 284166 | 1,6E-11 | 2,49E-13 | 2,816597 | 0,01783 | 0,017825 | 2,81615 | 0,050202 |
| 345397 | 1,6E-11 | 2,49E-13 | 2,809729 | 0,01819 | 0,018186 | 2,809264 | 0,051096 |
| 419821 | 1,5E-11 | 2,48E-13 | 2,802589 | 0,01856 | 0,01856 | 2,802106 | 0,052014 |
| 510281 | 1,5E-11 | 2,47E-13 | 2,795285 | 0,01892 | 0,018913 | 2,794785 | 0,052864 |
| 620234 | 1,5E-11 | 2,47E-13 | 2,787493 | 0,01925 | 0,019244 | 2,786976 | 0,053639 |
| 753878 | 1,5E-11 | 2,46E-13 | 2,779048 | 0,01958 | 0,019577 | 2,778515 | 0,054401 |
| 916320 | 1,5E-11 | 2,45E-13 | 2,769787 | 0,01989 | 0,01989 | 2,769239 | 0,055087 |
| 1113763 | 1,5E-11 | 2,44E-13 | 2,759348 | 0,02029 | 0,020292 | 2,75878 | 0,055988 |
| 1353750 | 1,5E-11 | 2,43E-13 | 2,747261 | 0,02061 | 0,020608 | 2,746677 | 0,056613 |
| 1645448 | 1,5E-11 | 2,42E-13 | 2,732944 | 0,02081 | 0,020804 | 2,732352 | 0,056853 |
| 2000000 | 1,5E-11 | 2,4E-13 | 2,714622 | 0,02105 | 0,02105 | 2,714021 | 0,057139 |

Hodnoty pro Nyquistovy diagramy

| f [Hz] | 100B | | | | 050B | | | | LETOXIT PR 108 | | | |
|---------|---------|---------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|----------------|---------|-----------|-----------|
| | Z [Ω] | φ [°] | Z{Re} [Ω] | Z{Im} [Ω] | Z [Ω] | φ [°] | Z{Re} [Ω] | Z{Im} [Ω] | Z [Ω] | φ [°] | Z{Re} [Ω] | Z{Im} [Ω] |
| 20 | 2,3E+08 | -86,612 | 1,4E+07 | -2E+08 | 4E+08 | -88,77 | 8606757 | -4E+08 | 4,9E+08 | -88,016 | 1,7E+07 | -5E+08 |
| 24 | 1,9E+08 | -88,494 | 4934680 | -2E+08 | 3,3E+08 | -88,716 | 7439515 | -3E+08 | 4,2E+08 | -88,26 | 1,3E+07 | -4E+08 |
| 30 | 1,5E+08 | -85,996 | 1,1E+07 | -2E+08 | 2,8E+08 | -88,716 | 6254872 | -3E+08 | 3,3E+08 | -88,329 | 9726859 | -3E+08 |
| 36 | 1,2E+08 | -86,246 | 8139225 | -1E+08 | 2,3E+08 | -88,191 | 7136208 | -2E+08 | 2,8E+08 | -88,015 | 9615984 | -3E+08 |
| 44 | 1E+08 | -89,131 | 1586370 | -1E+08 | 1,8E+08 | -87,478 | 8046518 | -2E+08 | 2,3E+08 | -87,284 | 1,1E+07 | -2E+08 |
| 53 | 8,8E+07 | -88,657 | 2069568 | -9E+07 | 1,5E+08 | -89,015 | 2643587 | -2E+08 | 1,8E+08 | -89,264 | 2310503 | -2E+08 |
| 64 | 7,4E+07 | -87,027 | 3816256 | -7E+07 | 1,2E+08 | -86,385 | 7585970 | -1E+08 | 1,5E+08 | -89,933 | 178936 | -2E+08 |
| 78 | 5,7E+07 | -87,682 | 2324548 | -6E+07 | 1E+08 | -87,269 | 4843212 | -1E+08 | 1,3E+08 | -88,418 | 3499705 | -1E+08 |
| 95 | 4,8E+07 | -87,759 | 1891982 | -5E+07 | 8,6E+07 | -89,582 | 627796 | -9E+07 | 1E+08 | -88,987 | 1775636 | -1E+08 |
| 116 | 4E+07 | -88,254 | 1227786 | -4E+07 | 7E+07 | -89,6 | 486144 | -7E+07 | 8,5E+07 | -87,927 | 3066551 | -8E+07 |
| 141 | 3,3E+07 | -88,554 | 836004 | -3E+07 | 5,8E+07 | -89,409 | 594235 | -6E+07 | 6,9E+07 | -89,678 | 389989 | -7E+07 |
| 171 | 2,7E+07 | -88,531 | 701513 | -3E+07 | 4,7E+07 | -89,361 | 528421 | -5E+07 | 5,7E+07 | -89,588 | 409668 | -6E+07 |
| 208 | 2,3E+07 | -88,694 | 513822 | -2E+07 | 3,9E+07 | -89,459 | 368830 | -4E+07 | 4,7E+07 | -89,741 | 212116 | -5E+07 |
| 253 | 1,9E+07 | -88,753 | 404842 | -2E+07 | 3,2E+07 | -89,486 | 288369 | -3E+07 | 3,9E+07 | -89,709 | 195965 | -4E+07 |
| 307 | 1,5E+07 | -88,774 | 328322 | -2E+07 | 2,6E+07 | -89,462 | 248907 | -3E+07 | 3,2E+07 | -89,689 | 172287 | -3E+07 |
| 373 | 1,3E+07 | -88,839 | 256212 | -1E+07 | 2,2E+07 | -89,475 | 199759 | -2E+07 | 2,6E+07 | -89,62 | 173460 | -3E+07 |
| 454 | 1E+07 | -88,893 | 201564 | -1E+07 | 1,8E+07 | -89,433 | 177793 | -2E+07 | 2,2E+07 | -89,647 | 132519 | -2E+07 |
| 552 | 8597760 | -88,93 | 160554 | -9E+06 | 1,5E+07 | -89,468 | 137352 | -1E+07 | 1,8E+07 | -89,631 | 114021 | -2E+07 |
| 671 | 7091140 | -88,962 | 128423 | -7E+06 | 1,2E+07 | -89,451 | 116730 | -1E+07 | 1,5E+07 | -89,63 | 94086,8 | -1E+07 |
| 815 | 5843960 | -89,012 | 100778 | -6E+06 | 1E+07 | -89,446 | 97038,5 | -1E+07 | 1,2E+07 | -89,577 | 88771,5 | -1E+07 |
| 991 | 4820150 | -89,035 | 81212,8 | -5E+06 | 8275970 | -89,421 | 83587,7 | -8E+06 | 9896270 | -89,586 | 71575,6 | -1E+07 |
| 1204 | 3971090 | -89,034 | 66948,9 | -4E+06 | 6811060 | -89,373 | 74533,4 | -7E+06 | 8144440 | -89,507 | 70049,3 | -8E+06 |
| 1464 | 3271390 | -89,06 | 53662,6 | -3E+06 | 5607440 | -89,38 | 60716,3 | -6E+06 | 6707390 | -89,507 | 57689,4 | -7E+06 |
| 1779 | 2697570 | -89,079 | 43341,3 | -3E+06 | 4621010 | -89,394 | 48866 | -5E+06 | 5527720 | -89,513 | 46974 | -6E+06 |
| 2162 | 2223170 | -89,093 | 35183,9 | -2E+06 | 3806500 | -89,377 | 41375,5 | -4E+06 | 4549170 | -89,477 | 41524,6 | -5E+06 |
| 2628 | 1832280 | -89,11 | 28476,4 | -2E+06 | 3135430 | -89,366 | 34715,9 | -3E+06 | 3748610 | -89,46 | 35322,8 | -4E+06 |
| 3195 | 1509720 | -89,119 | 23205,2 | -2E+06 | 2582880 | -89,354 | 29120,9 | -3E+06 | 3086380 | -89,45 | 29615,9 | -3E+06 |
| 3883 | 1244430 | -89,12 | 19116,7 | -1E+06 | 2128090 | -89,346 | 24297,9 | -2E+06 | 2543070 | -89,429 | 25338,9 | -3E+06 |
| 4720 | 1025420 | -89,118 | 15793,4 | -1E+06 | 1753070 | -89,329 | 20523,9 | -2E+06 | 2093910 | -89,421 | 21152,2 | -2E+06 |
| 5737 | 845084 | -89,112 | 13097 | -844983 | 1444300 | -89,316 | 17249,3 | -1E+06 | 1725330 | -89,403 | 17970,9 | -2E+06 |
| 6973 | 696441 | -89,102 | 10911,3 | -696356 | 1189990 | -89,294 | 14660,6 | -1E+06 | 1421190 | -89,387 | 15217,2 | -1E+06 |
| 8475 | 574031 | -89,084 | 9175,76 | -573958 | 980577 | -89,276 | 12390,4 | -980499 | 1170780 | -89,376 | 12750,5 | -1E+06 |
| 10301 | 473178 | -89,066 | 7715,59 | -473115 | 808003 | -89,253 | 10538,4 | -807934 | 964711 | -89,355 | 10868,3 | -964650 |
| 12521 | 389991 | -89,041 | 6529,97 | -389936 | 665800 | -89,233 | 8916,07 | -665740 | 794853 | -89,341 | 9136,43 | -794800 |
| 15219 | 321394 | -89,014 | 5533,38 | -321346 | 548534 | -89,212 | 7546,73 | -548482 | 654730 | -89,327 | 7696,04 | -654685 |
| 18498 | 264927 | -88,98 | 4717,93 | -264885 | 452024 | -89,187 | 6416,95 | -451978 | 539440 | -89,312 | 6478,31 | -539401 |
| 22484 | 218455 | -88,939 | 4044,72 | -218418 | 372619 | -89,159 | 5469,84 | -372579 | 444585 | -89,294 | 5481,15 | -444551 |
| 27329 | 180058 | -88,893 | 3479,28 | -180024 | 307017 | -89,127 | 4676,68 | -306981 | 366249 | -89,274 | 4638,09 | -366220 |
| 33218 | 148451 | -88,84 | 3005,31 | -148421 | 253045 | -89,094 | 4001,6 | -253013 | 301760 | -89,254 | 3928,32 | -301734 |
| 40375 | 122406 | -88,781 | 2604,06 | -122378 | 208562 | -89,058 | 3429,91 | -208534 | 248657 | -89,235 | 3322,08 | -248635 |
| 49075 | 100948 | -88,715 | 2264 | -100923 | 171923 | -89,017 | 2949,77 | -171898 | 204910 | -89,211 | 2822,37 | -204891 |
| 59649 | 83267,5 | -88,643 | 1971,79 | -83244 | 141741 | -88,974 | 2539,27 | -141718 | 168888 | -89,186 | 2399,31 | -168871 |
| 72502 | 68693,9 | -88,561 | 1724,85 | -68672 | 116871 | -88,926 | 2189,78 | -116850 | 139198 | -89,16 | 2040,19 | -139183 |
| 88125 | 56675,2 | -88,472 | 1510,88 | -56655 | 96370,5 | -88,878 | 1887,9 | -96352 | 114736 | -89,134 | 1735,12 | -114723 |
| 107113 | 46772,2 | -88,375 | 1326,44 | -46753 | 79479,3 | -88,824 | 1631,07 | -79463 | 94582,6 | -89,107 | 1473,92 | -94571 |
| 130194 | 38598,1 | -88,269 | 1165,93 | -38580 | 65539,3 | -88,768 | 1409,03 | -65524 | 77956,8 | -89,081 | 1250,34 | -77947 |
| 158247 | 31877,7 | -88,156 | 1025,83 | -31861 | 54079,3 | -88,709 | 1218,33 | -54066 | 64289,3 | -89,054 | 1061,64 | -64281 |
| 192345 | 26322,1 | -88,031 | 904,533 | -26307 | 44611 | -88,647 | 1053,36 | -44599 | 53002,9 | -89,029 | 898,575 | -52995 |
| 233790 | 21735,3 | -87,894 | 798,623 | -21721 | 36798,9 | -88,581 | 911,598 | -36788 | 43691 | -89,002 | 760,683 | -43684 |
| 284166 | 17956,6 | -87,746 | 706,351 | -17943 | 30365,9 | -88,513 | 788,158 | -30356 | 36025,9 | -88,978 | 642,318 | -36020 |
| 345397 | 14842,2 | -87,585 | 625,357 | -14829 | 25066,8 | -88,438 | 683,113 | -25057 | 29715,5 | -88,958 | 540,386 | -29711 |
| 419821 | 12272,8 | -87,412 | 554,12 | -12260 | 20694,8 | -88,361 | 591,805 | -20686 | 24510,7 | -88,936 | 455,017 | -24506 |
| 510281 | 10150,5 | -87,22 | 492,293 | -10139 | 17087,4 | -88,28 | 512,762 | -17080 | 20216,3 | -88,916 | 382,527 | -20213 |
| 620234 | 8401,55 | -87,019 | 436,862 | -8390,2 | 14115 | -88,191 | 445,579 | -14108 | 16680,3 | -88,895 | 321,587 | -16677 |
| 753878 | 6956,85 | -86,801 | 388,281 | -6946 | 11662,3 | -88,098 | 387,052 | -11656 | 13764,2 | -88,878 | 269,473 | -13762 |
| 916320 | 5765,81 | -86,569 | 345,093 | -5755,5 | 9640,95 | -87,997 | 337,036 | -9635,1 | 11362,2 | -88,86 | 226,155 | -11360 |
| 1113763 | 4781,61 | -86,319 | 307,003 | -4771,7 | 7972,93 | -87,889 | 293,66 | -7967,5 | 9380,7 | -88,837 | 190,382 | -9378,8 |
| 1353750 | 3970,91 | -86,046 | 273,809 | -3961,5 | 6600,55 | -87,774 | 256,408 | -6595,6 | 7752,06 | -88,82 | 159,655 | -7750,4 |
| 1645448 | 3304,11 | -85,765 | 243,994 | -3295,1 | 5472,57 | -87,658 | 223,604 | -5468 | 6414,36 | -88,806 | 133,705 | -6413 |
| 2000000 | 2753,06 | -85,49 | 216,472 | -2744,5 | 4541,71 | -87,532 | 195,541 | -4537,5 | 5311,33 | -88,793 | 111,899 | -5310,2 |

Příklad výpočtu Cole-Cole diagramu pro vzorek 100B (při 20 Hz):

$$\varepsilon = C \cdot \frac{d}{S} = 3,48 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{0,1688}{11,34} = 5,18 \cdot 10^{-13} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{5,18 \cdot 10^{-13}}{8,8541 \cdot 10^{-14}} = 5,848$$

$$\varepsilon_r\{Re\} = \varepsilon_r \cdot \cos \delta = 5,848 \cdot 0,999 = 5,845$$

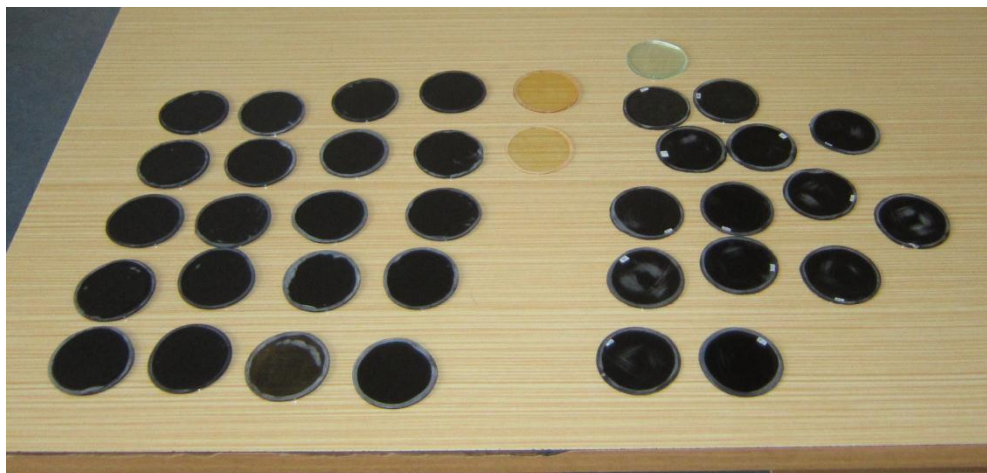
$$\varepsilon_r\{Im\} = \varepsilon_r \cdot \sin \delta = 5,848 \cdot 0,026 = 0,154$$

Příklad výpočtu Nyquistova diagramu pro vzorek 100B (při 20 Hz):

$$Z\{Re\} = Z \cdot \cos \varphi = 2,293 \cdot 10^8 \cdot 0,059 = 1,355 \cdot 10^7$$

$$Z\{Im\} = Z \cdot \sin \varphi = 2,293 \cdot 10^8 \cdot (-0,998) = 2,289 \cdot 10^8$$

Obrázky vzorků



Všechny měřené vzorky, vlevo s matricí PR 108, vpravo s matricí PR 102



Dedopované vzorky s PANI-H₂SO₄, u některých došlo vlivem odpaření tvrdidla v ultrazvuku ke sražení polyanilinu



Nezdařené pokusy o tepelné vytvrzení vzorků