

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti znovuvyužití epoxidových zalévacích směsí

Autor práce: **Bc. Jan Frank**
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Hornak, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan FRANK**
Osobní číslo: **E20N0003P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Možnosti znovupoužití epoxidových zalévacích směsí**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Definujte základní vlastnosti epoxidových pryskyřic tvrditelných při pokojové teplotě, tzv. „cold-cure“.
2. Provedte literární rozbor možností opětovného použití nejen takto vytvrzených epoxidových pryskyřic.
3. Navrhněte výrobní postup a realizujte testovací vzorky plněné opětovně použitým epoxidem.
4. Provedte experimentální měření vybraných materiálových vlastností s následnou diskuzí výsledků.



[Faint signatures and text, likely representing the university's official stamp and the names of the responsible faculty members.]

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. FRIGIONE, M., C. NADDEO a D. ACIERNO. Cold-Curing Epoxy Resins: Aging and Environmental Effects. I – Thermal Properties. *Journal of Polymer Engineering*. 2001, 21(1).
2. CORCIONE, C., F. FREULI a M. FRIGIONE. Cold-Curing Structural Epoxy Resins: Analysis of the Curing Reaction as a Function of Curing Time and Thickness. *Materials*. 2014, 7(9), 6832-6842.
3. MOHAN, T.P. a K. KANNY. Reuse of cured epoxy as a reinforcement in an epoxy composite. *Polymer Engineering & Science*. 2013, 53(9), 1839-1844.
4. MENTLÍK, V. *Dielektrické proky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Hornak, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**





Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na možnost znovuvyužití epoxidové pryskyřice jako plniva v nově vyráběných epoxidových pryskyřicích. Cílem diplomové práce je porovnání elektrických a mechanických vlastností za studena tvrzené epoxidové pryskyřice s vlastnostmi nově vzniklých vzorků. Nově vzniklé vzorky jsou vytvořeny s 1% plněním na prášek rozdrcených epoxidových pryskyřic. K plnění vzorků jsou použity nestárnuté epoxidové pryskyřice a pryskyřice podrobené zrychlenému stárnutí teplem a UV světlem. Práce také vyhodnocuje vlastnosti epoxidové pryskyřice před a po stárnutí teplem a UV světlem.

Klíčová slova

Epoxidové pryskyřice, polymery, reaktoplasty, znovuvyužití epoxidových pryskyřic, pyrolýza, solvolýza, mechanické drcení, stárnutí, rezistivita, polarizační indexy, dielektrické ztráty, permitivita, tahové zkoušky, BDS, statistické vyhodnocení

Abstract

This diploma thesis focuses on the possibility of reusing epoxy resin as a filler in newly produced epoxy resins. The aim of the diploma thesis is to compare the electrical and mechanical properties of cold-cured epoxy resin with the properties of newly formed samples. The newly formed samples were made with a 1% filling to the crushed epoxy resins. The fillers were made of ageless epoxy resin and heat and UV light aged resin. Furthermore, the properties of the epoxy resin before and after aging by heat and UV light were also evaluated.

Key Words

Epoxy resins, polymers, thermosets, epoxy resin reuse, pyrolysis, solvolysis, mechanical crushing, aging, resistivity, polarization indices, dielectric losses, permittivity, tensile tests, BDS, statistical evaluation

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Hornakovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Epoxidová pryskyřice	- 2 -
1.1 Vytvrzování epoxidových pryskyřic	- 3 -
1.1.1 Polyadice epoxidových pryskyřic	- 4 -
1.1.2 Polymerace epoxidových pryskyřic	- 5 -
1.2 Možnost znovuvyužití	- 6 -
1.2.1 Pyrolýza epoxidové pryskyřice.....	- 6 -
1.2.2 Selektivní chemická degradace epoxidové pryskyřice	- 7 -
1.2.3 Mechanické zpracování epoxidové pryskyřice	- 8 -
1.3 Využití.....	- 11 -
1.3.1 Zalévací směsi z epoxidových pryskyřic	- 12 -
1.3.2 Pryskyřice vytvrzované za studena (cold-cure)	- 13 -
1.4 Stárnutí materiálu	- 14 -
1.4.1 Tepelné namáhání	- 14 -
1.4.2 UV namáhání	- 15 -
2 Klíčové elektrické a mechanické parametry a jejich diagnostika.....	- 16 -
2.1 Relativní permitivita a ztrátový činitel.....	- 16 -
2.1.1 Relativní permitivita	- 16 -
2.1.2 Dielektrické ztráty.....	- 18 -
2.1.3 Diagnostika relativní permitivity a ztrátového činitele.....	- 20 -
2.2 Elektrická vodivost a polarizační indexy	- 22 -
2.2.1 Elektrická vodivost	- 22 -
2.2.2 Polarizační indexy.....	- 23 -
2.2.3 Diagnostika elektrické vodivosti a polarizačních indexů	- 25 -
2.3 Mechanické vlastnosti	- 26 -
2.3.1 Tahové vlastnosti	- 26 -
2.3.2 Diagnostika tahových vlastností	- 28 -

3	Praktická část.....	- 29 -
3.1	Materiál	- 29 -
3.1.1	Výroba vzorků	- 29 -
3.1.2	Drcení vzorků	- 33 -
3.2	Použité diagnostické metody.....	- 34 -
3.3	Výsledky vyhodnocených dat	- 37 -
3.3.1	Vyhodnocení vnitřních rezistivit a polarizačních indexů	- 38 -
3.3.2	Vyhodnocení ztrátových činitelů	- 44 -
3.3.3	Vyhodnocení relativních permitivit	- 48 -
3.3.4	Vyhodnocení mechanických vlastností	- 52 -
3.4	Shrnutí výsledků měření.....	- 53 -
3.4.1	Zhodnocení vnitřních rezistivit a polarizačních indexů.....	- 53 -
3.4.2	Zhodnocení ztrátových činitelů	- 54 -
3.4.3	Zhodnocení relativních permitivit.....	- 54 -
3.4.4	Zhodnocení mechanických vlastností	- 55 -
4	Závěr.....	- 56 -
5	Literatura	- 57 -
6	Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
A, B	Materiálové konstanty	(-)
BDS	Širokopásmová dielektrická spektroskopie	
C	Elektrická kapacita	(F)
d	Tloušťka dielektrika	(m)
E	Intenzita elektrického pole	(V · m ⁻¹)
\vec{E}_M	Vektor intenzity elektrického pole	(V · m ⁻¹)
EP	Epoxidová pryskyřice	
f	Frekvence	(Hz)
F_{MAX}	Maximální síla	(N)
I	Elektrický proud	(A)
$i_A(t)$	Absorpční proud	(A)
i_{A15}	Absorpční proud v patnácté vteřině	(A)
i_{A60}	Absorpční proud v šedesáté vteřině	(A)
i_{A600}	Absorpční proud v desáté minutě	(A)
Im	Imaginární část komplexních složek	
I_p	Povrchový proud	(A)
l_p	Délka povrchu dielektrika mezi elektrody	(m)
p_i	Polarizační index	(-)
p_{i1}	Jednominutový polarizační index	(-)
p_{i10}	Desetiminutový polarizační index	(-)
Re	Reálná část komplexních složek	
R_{iz}	Izolační elektrický odpor	(Ω)
R_v	Izolační elektrický odpor vzorku	(Ω)
R_{15}	Elektrický odpor v patnácté vteřině	(Ω)
R_{60}	Elektrický odpor v šedesáté vteřině	(Ω)
S	Plocha elektrod na materiálu	(m ²)
T	Teplota	(°C)
T_g	Teplota skelného přechodu	(°C)
$tg \delta$	Ztrátový činitel	(-)
U	Napětí	(V)
Z^*	Komplexní impedance	(Ω)
γ	Měrná elektrická vodivost (konduktivita)	(S · m ⁻¹)
γ_p	Měrná povrchová elektrická vodivost (povrchová konduktivita)	(S · m ⁻¹)
ε	Permitivita	(F · m ⁻¹)
ε_0	Permitivita vakua	(F · m ⁻¹)
ε_r	Relativní permitivita	(-)
ε^*	Komplexní relativní permitivita	(-)
ε'	Reálná část komplexní relativní permitivity (kapacitní složka)	(-)
ε''	Imaginární část komplexní relativní permitivity (ztrátová složka)	(-)
ω	Úhlová frekvence	(s ⁻¹)
φ	Fázový úhel	(°)
σ_M	Mez pevnosti v tahu	(Pa)
σ_Y	Mez kluzu v tahu	(Pa)
ρ	Měrný elektrický odpor (rezistivita)	(Ω · m)
ρ_v	Měrný elektrický odpor vzorku (rezistivita vzorku)	(Ω · m)
ρ_p	Měrný povrchový elektrický odpor (povrchová rezistivita)	(Ω)
δ	Ztrátový úhel	(°)
τ	Délka životnosti izolace	(s)

Úvod

Dnešní doba přináší nové technologie a přístroje, které nahrazují stávající méně výkonné či méně praktické nástroje. Vyřazená zařízení se stávají po své době života problémem a je nutné se jich co nejekologičtěji a nejekonomičtěji zbavit. Jedním takovým často využívaným materiálem v elektrotechnice je epoxidová pryskyřice. Tyto reaktoplasty jsou špatně recyklovatelné kvůli své tvrdé struktuře a jejich znovuvyužití tedy náročné a velice omezené.

Tato diplomová práce je zaměřena právě na epoxidové pryskyřice a na jejich znovuvyužití. Práce je zabývá popisem epoxidových pryskyřic tvrditelných při pokojové teplotě (tzv. cold-cure pryskyřic), které byly využity i pro experimentální část. Dnes již existují a stále jsou vyvíjené techniky, jak se vysloužilá epoxidová pryskyřice může zpracovat pro další využití. Nejrozšířenější techniky jsou popsány v této práci. Jedna z popsaných technik byla modifikována pro experimentální účely pro tuto práci. Konkrétně se jednalo o mechanické zpracování vytvrzených epoxidových pryskyřic. Tato technika byla podrobena praktickému experimentu a její výsledky jsou zpracovány v druhé půlce této práce. V rámci této práce se hodnotily vlivy 1% plnění nestárnuté, UV světlem a teplem stárnuté práškové výplně v nově vzniklých vzorkách a jejich vliv na elektrické a mechanické vlastnosti. Zároveň jsou v práci zpracované zkoumané vlastnosti a jejich možnosti diagnostiky.

1 Epoxidová pryskyřice

Sousloví epoxidová pryskyřice označuje velkou skupinu sloučenin, jejichž molekula obsahuje atomy z dvou a více epoxidových (oxiranových, ethylenoxidových) skupin. [1] Tyto skupiny jsou velice reaktivní. Silná reaktivita s mnoha druhy látek vede k různým druhům zasíťovaných makromolekulárních produktů. Druh zasíťování tedy určuje specifické vlastnosti pryskyřic a jejich následné využití v praxi. [2]

První zmínky o epoxidových pryskyřicích jsou z roku 1891, kdy se R. Linderman zabýval reakcemi mezi fenoly a epichlorhydriny. Pevné základy epoxidových pryskyřic však byly stanoveny až ve třicátých letech 20. století výzkumníkem Shlackem. [3] V padesátých letech se epoxidové pryskyřice dostaly do Československé republiky, později v sedmdesátých letech byla Československá republika jedním z dominantních výrobců tohoto materiálu. V roce 1975 měla ČSSR podíl až 2,54% z celkové světové produkce, což bylo 3x více než např. USA a 5x více než Japonsko. Hlavním výrobcem byl Spolek pro chemickou a hutní výrobu sídlící v Ústí nad Labem. Produkt nesl název ChS-Epoxy a čísla po tomto názvu označovala jednotlivé typy pryskyřic. Dále měli pryskyřice názvy jako Epon či Upon. Plněné pryskyřice různými plnivými pak nesly název Eprosin. [2]

Epoxidové pryskyřice jsou průhledné kapaliny až křehce tvrdé látky s lehce nažloutlou barvou. [1] Jsou odolné vůči vodě, kyselinám, zásadám, roztokům alkálií a některým druhům rozpouštědel (záleží na molekulárním typu). [4] Nízkomolekulární typy epoxidových pryskyřic se dají rozpouštět v aromatických uhlovodících, kdežto vysokomolekulární typy se dají rozpouštět v esterech a ketonech. [1]

Mezi jejich preferované vlastnosti se řadí především elektroizolační vlastnosti a chemická odolnost. Chemická odolnost úměrně roste se stupněm zasíťování a molekulovou hmotností. Svoji roli také hraje zvolený druh tvrdidla. Epoxidové pryskyřice mají vysokou adhezi k velkému množství dalších látek, jako jsou kovy, dřevo, keramika nebo sklo. Skladování pryskyřice je na doporučení výrobce. [1]

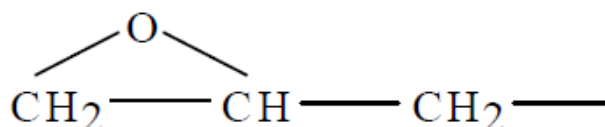
Typické hodnoty vybraných parametrů epoxidových pryskyřic jsou například elektrická pevnost dosahující až 40 kV/mm, ztrátový činitel kolem 0,01 a relativní permitivita pohybující se kolem hodnoty 5. Některé epoxidové pryskyřice jsou použitelné do 150 °C.

Epoxidové pryskyřice se řadí mezi polymery a konkrétně mezi reaktoplasty. Reaktoplasty mají nevratnou chemickou reakci, při které přechází z lineárního stavu do stavu síťovaného. Tomuto procesu se říká vytvrzování a dávají reaktoplastům jejich

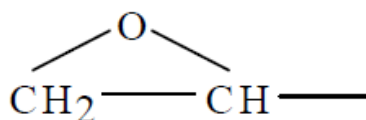
specifickou netavitelnou a těžko rozpustitelnou vlastnost. Vytvrzením reaktoplasty ztrácí svůj termoplastický charakter a stávají se tvrdými a velice stálými polymery.

Epoxidové pryskyřice můžeme rozdělit na dvě skupiny:

- Typy, které obsahují glycidylóvé skupiny (viz Obr. 1.1), které jsou vytvořeny reakcí epichlorhydrinu s vhodnou surovinou [4]
- Typy, které obsahují epoxidové skupiny (viz Obr. 1.2), které jsou vytvořeny epoxidací nenasycených sloučenin [4]



Obr. 1.1 Glycidylóvá skupina [2]



Obr. 1.2 Epoxidová skupina [2]

1.1 Vytvrzování epoxidových pryskyřic

Pod pojmem vytvrzování se skrývá proces, při kterém se nízkomolekulární rozpustné a tavitelné (epoxidové) monomery a oligomery chemicky převádí na netavitelné a nerozpustné polymery. [2] Takto vytvrzené materiály mají trojrozměrnou strukturu. Vytvrzená epoxidová pryskyřice získává celou řadu nových vlastností, jako je například mechanická pevnost, rozměrová stálost, tepelná odolnost a další vlastnosti, které se hodí pro jednotlivá odvětví v praxi vybrána dle použití.

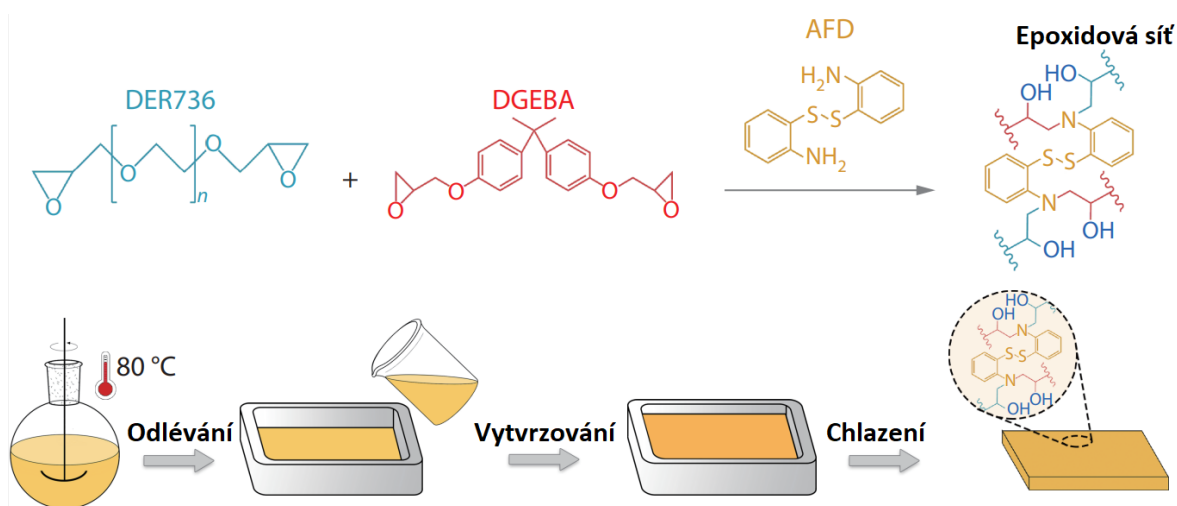
Vytvrzování epoxidových pryskyřic se provádí v součinnosti s tvrdidly.

Tvrdidla jsou látky, které:

- a) reagují s epoxidovými (hydroxylovými) skupinami prepolymery obsažené v pryskyřici a po vytvrzení se stávají součástí vytvořené sítě. Klasickými zástupci těchto tvrdidel jsou polyamidy, polysulfidy či ftalanhydridy. [2]
- b) inicializují polymeraci epoxidových skupin a takto vzniklá síť je složena pouze z jednotlivých částic epoxidové pryskyřice. Takto vzniklý materiál je pak označován jako homopolymer. Klasickými zástupci těchto tvrdidel jsou polymerační (katalytická) tvrdidla, jako je například Lewisova báze. [2]

Není však vyloučená ani situace, kdy oba výše popsané typy tvrdidel působí na danou epoxidovou pryskyřici současně a struktury se tak vytváří vedle sebe. [2]

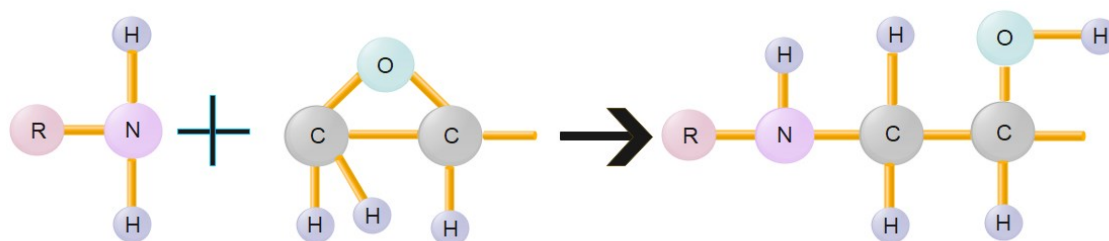
Vytvrzování epoxidových pryskyřic lze dosáhnout několika mechanismy. V praxi se nejvíce využívá vytvrzení pomocí polyadice epoxidových pryskyřic s aktivním vodíkovým atomem. Dále lze využít pro vytvrzení i procesy polymerace a polykondenzace. [1] Na obrázku 1.1.1 lze vidět proces vytvrzování pryskyřice, která není za studena tvrditelná.



Obr. 1.1.1 Grafické ztvárnění vytvrzení epoxidové pryskyřice, inspirováno [5]

1.1.1 Polyadice epoxidových pryskyřic

Polyadice je zvláštním případem polykondenzace, během které, na rozdíl od polykondenzace, nedochází k odštěpení nízkomolekulárních látek. Tato reakce je stupňovitá. Reagují zde dva odlišné druhy monomerů, které obsahují reaktivní atomové skupiny. Zde se tedy pouze přeskupují atomy a dochází tak k vnitřní molekulární přeměně. Nevzniká ani žádný štěpný produkt a vodíkový atom se jen přesouvá z jedné reaktivní skupiny na jinou, čímž probíhá adice, tedy slučování. Příklad vytvrzení polyadicí je vidět na Obr 1.1.2.



Obr. 1.1.2 Schéma přípravy epoxidové pryskyřice polyadicí (R = polyether nebo polyester), inspirováno [4]

Vytvrdit epoxidovou pryskyřici lze provést pomocí polyaminů. Při této reakci probíhá právě polyadice. Tato polyadice proběhne za reakce epoxidové pryskyřice a primární a sekundární alifatické formy polyaminů. Pro vytvrzení je potřeba, aby polyamin použitý pro vytvrzení měl alespoň 3 aktivní atomy vodíku. Toto vytvrzení dovoluje vytvrdit materiál za nízkých teplot během krátké doby. Uplatnění tohoto druhu vytvrzení je především při použití u lepidel, tmelů či nátěrových hmot určených k ochraně povrchu. [4]

Pro vytvrzení epoxidové pryskyřice lze využít i reakce s vícefunkčními polythiolovými skupinami. Tato reakce může probíhat i během nízkých teplot. Reakci lze zrychlit přidáním aminů. [4]

Mezi nejdůležitější tvrdidla pro polyadiční vytvrzení lze však označit anhydridové polykarboxylové skupiny. Využívá se především v kombinaci s nízkomolekulárními typy pryskyřic u impregnačních, laminačních, ale především u zalévacích pryskyřic. Spolu s vysokomolekulárními typy pryskyřic se využívá i pro nátěrové aplikace. Pro vytvrzení je oproti předchozím reakcím zapotřebí zahřát materiál až na 200 °C po dobu několika hodin. [4]

1.1.2 Polymerace epoxidových pryskyřic

Polymerací se rozumí reakce, při které spolu přímo reagují jednotlivé monomery. Reagují spolu tak, že rozevřou své dvojně vazby a propojí se do velké řetězové molekuly polymeru. K rozštěpení násobných vazeb, jako je například právě dvojná vazba, dochází reakcí reaktivních radikálů R (vysoce reaktivní částice, která obsahuje alespoň jeden nepárový elektron), anebo iontů, které se vyprodukují rozpadem reaktivních látek. Reaktivní látky zde plní roli iniciátorů reakcí a jejich činnost je závislá na přísunu například tepelné či infračervené energie.

Radikál reaguje okamžitě s molekulou monomeru a rozštěpí násobnou vazbu. Tím vznikne nový rozsáhlý radikál, který vytvoří řetězovou reakci a dochází k růstu tohoto řetězce. Na konci rostoucí makromolekuly se stále objevuje volný elektron čekající na další propojení s atomem. Při polymeraci nedochází, stejně jako u polyadice, ke vzniku vedlejšího produktu.

Jako katalyzátory pro polymeraci epoxidových pryskyřic lze využít terciální aminy a kvartérní amoniové sloučeniny či komplexy fluoridu boritého. Molekuly pryskyřice se vytvářejí výhradně přes etherové můstky. Pro vytvrzení při teplotách od 0 do 10 °C se často využívají tvrdidla BF₃-etherátu, čehož se využívá při zalévání kabelových koncovek v terénu. [4]

1.2 Možnost znovuvyužití

Až do nedávna se reaktoplasty, kam spadají i epoxidové pryskyřice, považovaly za neznovupoužitelné materiály. Dnes bychom však reaktoplasty mohli zahrnout mezi materiály, které jsou recyklovatelné, byť je jejich recyklace velice obtížná. [6]

Charakteristickým rysem reaktoplastů jsou kovalentní vazby intermolekulárních chemických příčných vazeb, které vytvářejí zvýšenou pevnost a tuhost a snižují náchylnost k tečení ve srovnání s termoplasty. V důsledku toho se stávají méně náchylnými k poškození tepelnými a chemickými impulzy z okolního prostředí. To je právě důvod, proč jsou vhodné pro použití v konstrukčních a ochranných (kompozitních) aplikacích. Tato vysoká mechanická a tepelná stabilita z reaktoplastů vytváří obtížně recyklovaný materiál. [7]

Nejčastějším řešením u odpadních reaktoplastů je skládkování tohoto materiálu anebo kvartérní recyklace po skončení životního cyklu. Kvartérní recyklací se rozumí proces spalování materiálu za účelem zisku alespoň energetického obsahu. Spalování nám nejen umožňuje se zbavovat objemu materiálu, které není možno zrecyklovat jinak, ale i získání tepelné energie. Získaná energie lze následně použít pro ohřev vody pro dálkové teplovody či vytvoření elektrické energie. Tato varianta bohužel vytváří toxické znečištění ovzduší. Emise lze však vhodným režimem a čištěním spalin eliminovat na malou míru, i tak to není z hlediska životního prostředí šetrné. [8]

V dnešní době se již ale objevují možnosti, kterými lze reaktoplast zpracovat a znovu začlenit do nových výrobků. Tyto možnosti se opírají o terciální možnost recyklace, kde se materiály rozloží na nízkomolekulární látky a ty se dále zpracovávají. Může se jednat o:

- a) pyrolýzu materiálu [9],
- b) selektivní chemickou degradaci materiálu [10],
- c) mechanické rozložení materiálu [11].

1.2.1 Pyrolýza epoxidové pryskyřice

Pyrolýza je fyzikálně-chemický děj spadající do termických procesů, při kterém se rozkládá materiál na nízkomolekulární produkty. Materiál je ohříván nad mez termické stability a během ohřívání je zamezeno přístupu vzduchu. [9]

Pyrolýza lze v uvažovaném případě využít primárně pro kompozity s epoxidovým základem, přičemž je takovým způsobem možné získat organické plnivo, které je dále využitelné. [7, 12–14]

Pyrolytické získání obsahu organického materiálu se jeví jako adekvátní způsob využití elektrického odpadu. [9] Aplikované teploty se pohybují v rozmezí 300–800 °C a výslednými produkty jsou plynné, kapalné a pevné sloučeniny na bázi uhlíku, které na rozdíl od aerobního spalování lze potenciálně použít jako surovinu pro další chemické zpracování. Není to tedy tak, že pouze spálíme materiál určený k recyklaci a získáme z něj organické plnivo, získáváme i materiál pro stavbu nových molekulárních bloků. S pomocí konkrétních katalyzátorů lze zvýšit produkci recyklace reaktoplastické pyrolýzy. [7]

Vše nasvědčuje tomu, že z hlediska oběhového hospodářství je pyrolýza považována za nejoptimálnější průmyslově dostupnou tepelnou recyklaci v současnosti. Přestože se v současné době vyvíjejí průmyslové procesy pyrolýzy, jejich ekonomická proveditelnost je stále sporná. Pokračující výzkumné úsilí týkající se aspektů, jako je snížení emisí znečišťujících látek a požadované snížení potřebné energie pro vykonání procesu, je potřeba vyřešit, než bude pyrolýza mít významný dopad na řešení problému s reaktoplastickým odpadem. [7]

1.2.2 Selektivní chemická degradace epoxidové pryskyřice

Tato degradace je jinak označována jako solvolýza. Solvolýza je recyklační strategie, při kterém se používá kapalina k rozpuštění a degradaci polymerní matrice. Stejně jako u pyrolýzy je hlavní motivací získat zpětně organická plniva. Navíc je možné z rozpouštědla znovu získat materiál pro stavbu nových molekulárních bloků. [7]

Solvolýza má oproti výše zmíněné pyrolýze a mechanickému zpracování (zmíněné v kapitole níže) u recyklace kompozitních materiálů nespornou výhodu. Díky rozpouštění matrice (často používaná je epoxidová pryskyřice) totiž neničí a nedegraduje organická plniva v daném materiálu. Mechanické zpracování kompozitů se hodí pro méně kvalitní kompozity, a navíc tímto procesem není zajištěna separace výplně daného kompozitu, nelze tak vhodně zajistit jeho znovuvyužití. [15] Jak ukazuje studie [16], také pyrolýza může způsobovat degradaci plniva nebo výztuže, a to zejména s ohledem na jejich mechanickou pevnost a čistotu. Teploty nad 600 °C způsobují silnou oxidaci uhlíkových vláken a snižují jejich pevnost o více než 30%. Čistota po pyrolýze není nad požadovaných 99,5%. [15]

V porovnání s výše uvedeným je solvolýza vhodným přístupem pro získání dlouhých, a především čistých, uhlíkových vláken, což také potvrzuje studie [15].

Podle druhu rozpouštěcího média lze rozdělit solvolýza na:

- a) štěpení hydrolýzou,
- b) štěpení glykolýzou,
- c) štěpení kyselinou.

Každý druh štěpení rozbíjí určitý druh vazeb. Solvolýza je vhodná pro rozbíjení širokého spektra vazeb reaktoplastických materiálů, především tedy epoxidové vazby. Z degradovaných rozpuštěných organických sloučenin lze znovu získat částice a použít je jako molekulární stavební bloky. V poslední době se velice často k selektivní chemické degradaci začaly využívat superkritické kapaliny. [7]

Nadkritické kapaliny jsou látky (sloučeniny), které mají tlak a teplotu vyšší, než je kritický bod. Tato kapalina je v jediném kondenzovaném stavu s vlastnostmi mezi kapalinou a plynem. Hustoty plynné a kapalné fáze se zde rovnají. Slouží jako dobrá rozpouštědla pro štěpení díky vysokým koeficientům transportu hmoty a difuzím. [10]

Výhodu oproti čistým kapalným rozpouštědlům je v rychlosti reakčnosti a selektivity. Degradací působení lze také modifikovat řízením tlaku. Oproti pyrolýze není koncepčně zapotřebí tepelné energie. V praxi se však solvolýza provádí při 200 °C z důvodu lepších účinků, a proto se někdy považuje solvolýza za termochemický recyklační proces. S ohledem na životní prostředí je nutné dbát zvýšené pozornosti, jelikož se zde používají nebezpečná rozpouštědla. [7]

Hlavní výzvou bude vyhotovit energeticky úspornou metodu poskytující masivní vytěžení organických složek z odpadních reaktoplastů. [10]

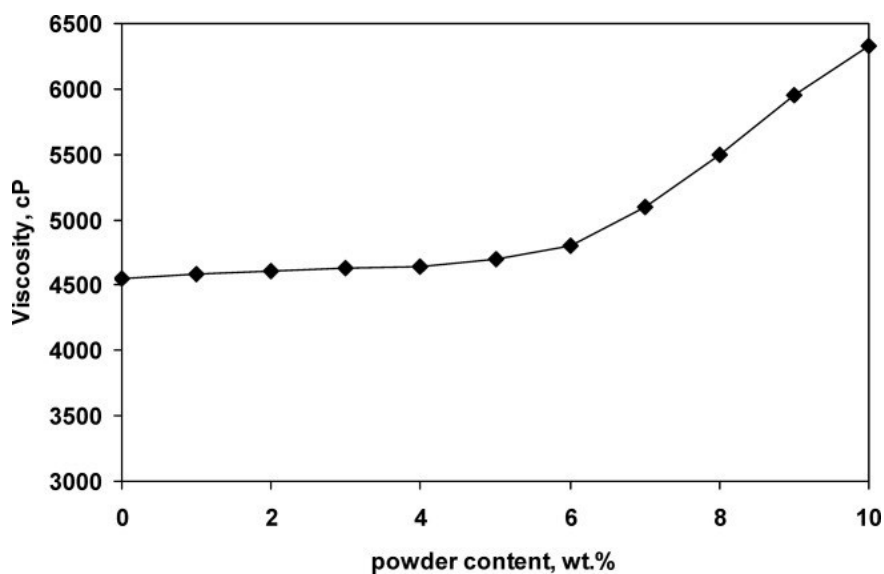
1.2.3 Mechanické zpracování epoxidové pryskyřice

Mechanická recyklace nejčastěji zahrnuje krok řezání, broušení a mletí za účelem přeměny materiálu různých tvarů na rovnoměrně velké částice. K rozmělnění se používají frézy, kládiové mlýny nebo vysokorychlostní mlýny, které nám materiál rozmělní na částice o rozměrech od několika milimetrů až do velikosti v rozmezí mikrometrů. [7] Typicky jsou tyto částice velké od 1 do 30 μm . [11] Malý prášek (průměr $<50 \mu\text{m}$) získaný po mechanickém mletí lze obecně použít pouze jako plnivo v nových reaktoplastických materiálech. Bohužel tyto prášky nemohou ekonomicky konkurovat běžným plnivům, jako jsou uhličitany vápenaté a křemičitany. Aby mohly plnit přidanou hodnotu jako plniva, mleté materiály by měly poskytnout další formu výztuže, jak bylo zamýšleno v původní aplikaci. [7]

Co se týče vlastností nově vzniklých materiálů pomocí prášků, je krom množství prášku rozhodujícím faktorem i velikost částic. V případě, že mají vločky velikosti v řádech nanometrů, vytvářejí nehomogenity ve velikostech atomárních rozměrů a nemají tedy velký vliv na elektrické vlastnosti. I při větším množství totiž takto malé nehomogenity nijak moc neovlivňují strukturu oproti případu, že je materiál vyrobený bez prášku. Oproti tomu větší vločky vnášejí do materiálu významně vyšší nehomogenity, a mohou při špatném zpracování negativně ovlivnit modifikovaný materiál. [17]

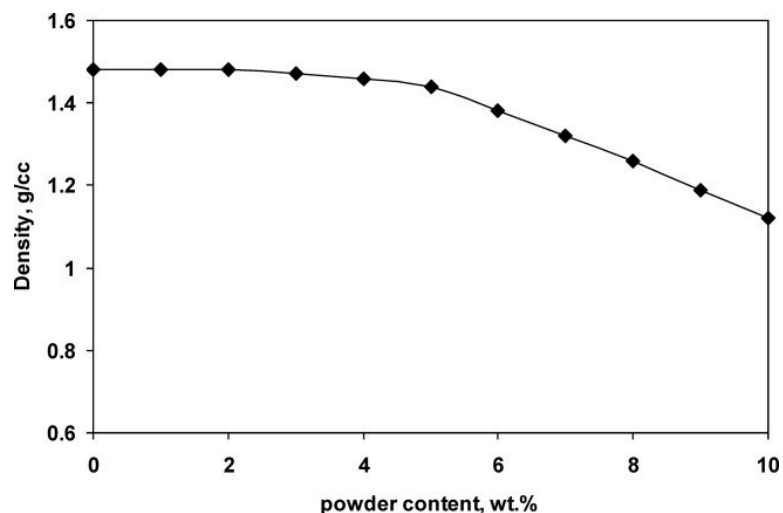
Vzhledem k tomu, že zasahujeme do celistvosti materiálu a pozměňujeme strukturu, dá se tedy předpokládat, že veškeré elektrické vlastnosti, jako je například rezistivita, relativní permitivita či polarizační indexy, budou v ideálním případě srovnatelné, anebo (a to spíše) budou tyto hodnoty vyšší. [17]

Co se týče i dalších vlastností, dle studie „Reuse of cured epoxy as a reinforcement in an epoxy composite“ [11] se prokázalo, že přidání až 5% hmotnostního prášku do epoxidové pryskyřice nemá výrazný vliv na dynamickou viskozitu daného materiálu během jeho přípravy (před vytvrzením). Hodnota dynamické viskozity se však začne zvedat po hodnotě 5%, jak je vidět na obrázku 1.2.1.



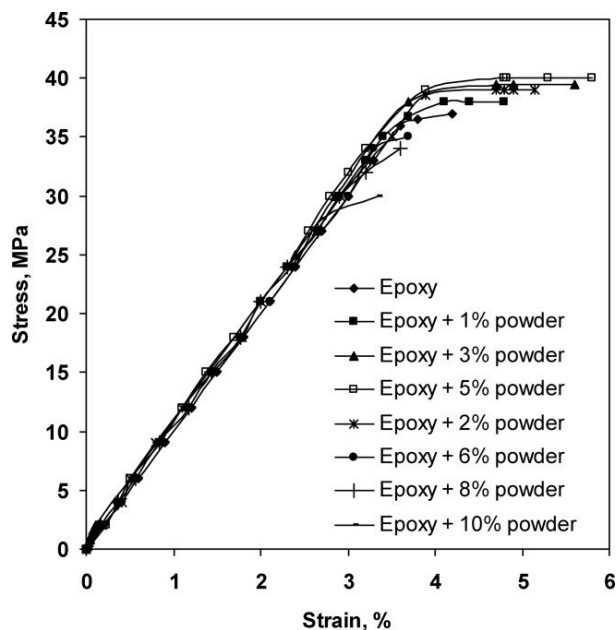
Obr. 1.2.1 Graf vývoje dynamické viskozity procentuálním množstvím prášku [11]

Stejně jako u viskozity je 5% hmotnostní hranice prášku zlomová i pro hustotu. Vlivem vyšší dynamické viskozity totiž není tak snadné zbavit tekutou hmotu vzduchových dutin. Tyto dutiny mohou následně měnit jak právě hustotu materiálu, ale i jiné vlastnosti. Vliv prášku na hustotě je znázorněn na obrázku 1.2.2.



Obr. 1.2.2 Graf vývoje hustoty procentuálním množstvím prášku [11]

Vyšší množství prášku má rozsáhlé nepříznivé důsledky u mechanické pevnosti nově vzniklého materiálu. Toto je dáno vytvořením drobných nehomogenit, které mohou způsobovat drobné zlomeniny při namáhání vedoucí k deformaci a rozlomení materiálu. Prášek také může do materiálu přinést již zmíněné vzduchové dutiny, které snižují celistvost materiálu a ovlivňují jeho mechanické vlastnosti. Proto je důležité jej před začleněním do nově vzniklého materiálu vysušit a zvolit takový výrobní proces, aby se zachovaly vlastnosti původního materiálu. [11] Na obrázku 1.2.3 lze vidět výsledný graf tahových zkoušek různého množství přidaného plniva.



Obr. 1.2.3 Graf tahové zkoušky procentuálním množstvím prášku [11]

Aby výsledný kompozit epoxidového prášku a pryskyřice měl stále dobré vlastnosti i při množství prášku nad 5% z pohledu mechanických vlastností, je potřeba jej tepelně vytvrdit. Po vytvrzení nového kompozitu vysokou teplotou může až 10% množství prášku být efektivním přínosem a nezměnit vlastnosti základního materiálu. [11]

Další zkoumanou variantou, jak vylepšit vlastnosti nově vzniklého materiálu je další úprava epoxidového prášku. Takovouto úpravou je myšleno jemnější drcení částic na rozměry nanometrů či chemickou povrchovou úpravou částic. Tyto procedury zlepšují tepelné a mechanické vlastnosti nových epoxidových kompozitů. [11]

1.3 Využití

Epoxidové pryskyřice mají své místo v těch oborech, kde levnější pryskyřice nedostačují a je za potřebí sáhnout po kvalitnějším materiálu, který je schopnější splnit požadované nároky. Velké využití našly při zajištění povrchové ochrany, jako jsou epoxidové nátěrové směsi pro ochranu betonových, dřevěných, kovových a dalších ploch. Zde je můžeme najít ve formě dvousložkových laků, barev, vypalovacích láků či práškových nátěrových hmot. Díky své schopnosti se málo rozpouštět našli uplatnění i jako potravinářský nátěr zásobníků a cisteren. [2, 4]

Dále se využívají ve stavebnictví jako pevná obložení podlah, vozovek či chodníků. Epoxidové pryskyřice se díky své adhezi využívají jako lepidla pro spojování substrátů ze skel, kovů, porcelánů či plastů. Tato lepidla lze využít nejen v elektrotechnice, ale i ve strojírenském průmyslu pro výrobu obráběcích nástrojů, brusných kotoučů anebo v náročných konstrukčních aplikacích. [4]

Nejvyšší význam má však tento materiál v elektrotechnice. Díky svým elektroizolačním, mechanickým a tepelným vlastnostem se uplatňují u transformátorů s litou izolací, kde se používá epoxidová pryskyřice na bázi alifatických glycidyleterů s tvrdidlem. [17] Také dále u statorů a rotorů, jako impregnace vinutí rozměrných cívek, nebo jako vysokonapěťová izolace či jako pouzdra u malých součástek. [2, 4]

1.3.1 Zalévací směsi z epoxidových pryskyřic

Elektroizolační zalévací směsi se uplatňují u vysokonapěťových aplikací, jako jsou právě transformátory. Své uplatnění mají i pro slaboproudou aplikaci, kde se zalévají jednotlivé součástky nebo celé plošné spoje, kde směs chrání daný plošný spoj před vnějšími vlivy. Zalévací hmota často obsahuje větší množství jednotlivých složek a vytvoří tak polymerní kompozit. [18]

Zalévací hmoty z epoxidových pryskyřic mají velice specifické vlastnosti, které jsou hojně využívány v mnoha aplikacích. Tyto pryskyřice málo navlhají a nevytváří póry na svém povrchu, jsou velice stálé a odolné vůči okolnímu prostředí, snadno přilnou díky vysoké adhezi k různým pláštům v kabelové technice. Mají dobré mechanické a chemické vlastnosti s krátkou dobou vytvrzování a jsou schopné odolat mechanickým a teplotním šokům. Především elektrické a izolační účinky jsou na vysoké úrovni. Tvrdost povrchu vytvrzených zalévacích pryskyřic se pohybuje okolo 85 jednotek dle Shore D. Použití mají zvláště v náročných aplikacích, čemuž se rozumí například chemicky agresivní prostředí či vliv dlouhodobého působení vysokých teplot a napětí. [19]

Epoxidové zalévací hmoty se dají rozdělit podle počtu složek, ze kterých jsou složeny. A to na:

a) jednosložkové [18, 19]

Využití je především u malých motorů, kde jsou jako drážková izolace, která je složená z práškové směsi. Využití práškové směsi má výhody z hlediska homogenní a rovnoměrné aplikace. Na impregnovaný substrát lze nanést stříkáním, ponořováním a elektrostatickým naprašováním.

b) Dvousložkové [18, 19]

Využití je především u ochrany elektrických komponentů a při zatěšňování spár, kde plní ochranu před vlhkostí. Skládají se z pryskyřice a tvrdidla. Pryskyřice lze vytvrdit při pokojové i při zvýšené teplotě. Pryskyřice tvrditelné za tepla oproti pryskyřicím tvrditelných za studena jsou univerzálnější a zpracovatelnější, protože je viskozita více kontrolovatelnější.

Vedle epoxidových pryskyřic lze jako zalévací hmoty využít i silikonové či polyuretanové hmoty. [20–22]

1.3.2 Pryskyřice vytvrzované za studena (cold-cure)

Epoxidové pryskyřice se běžně používají v aplikacích ve stavebnictví, elektrotechnice a při ochraně kulturních památek kvůli svým pokročilým chemickým a mechanickým vlastnostem, jako opravné materiály, lepidla, nátěry a matrice pro kompozity. Vzhledem k okolnostem, při kterých jsou epoxidy využívány, jsou některé faktory (povrchové úpravy, cyklus vytvrzování, vlhkost a jiné) při jejich výrobě a aplikaci nemožné korigovat a mohou silně ovlivnit dlouhodobou trvanlivost spojů. Pro takové aplikace je praktické a ekonomické využít cold-cure pryskyřice „za studena vytvrzované“. Cold-cure epoxidové pryskyřice mají schopnost dosáhnout polymerace a vhodného stupně vytvrzení při pokojové teplotě za přítomnosti vhodných vytvrzovacích činidel (alifatické či cykloalifatické aminy).

Pro využití epoxidů jako lepidel je velice důležitá okolní vlhkost, která má při provozních podmínkách významné degradační účinky, což vede ke změnám k chemickým a fyzikálním přeměnám. Epoxidová lepidla totiž ve vlhkém prostředí absorbují vodu. V důsledku navázání vody může dojít k hydrolýze nebo popraskání.

V elektrotechnice se epoxidové pryskyřice využívají pro impregnaci motorů, generátorů nebo transformátorů. Dále se s nimi můžeme setkat u integračních obvodů jako pojivo při zapouzdření substrátů DPS, senzorů, LED či dalších součástí pro zvýšení spolehlivosti elektrických zařízení. Některé součástky jsou však velmi citlivé na teplotu a není tedy možné využít epoxidy tvrditelné teplem. Musí se tedy použít cold-cure epoxidy. [22–24]

Po smíchání epoxidové pryskyřice s vytvrzovacím činidlem prochází materiál několika stavy. Nejprve je smíchaný materiál kapalný a může se s ním pracovat a dále zpracovávat, jako je například lití do forem, vynutí či jako nátěrový materiál. Takové fázi říkáme „Open time“ nebo jí označujeme jako pracovní dobu. [22]

Po kapalně fázi přecházíme do fáze gelovatění. Fáze gelovatění přichází po určité době, která je velice závislá na teplotě, při které se epoxidová pryskyřice (v tomto případě se jedná o teplotu okolí) začne vytvrzovat. Epoxid vstupuje do nezpracovatelné formy a z kapalně fáze přechází do lepivé gelové konzistence. Gelovatění nastává, když vzniká velká molekula makroskopických rozměrů a nekonečné molekulové hmotnosti. V tomto okamžiku jsou materiály nerozpustné a netavitelné. Může ale v materiálu docházet k dalším reakcím, které přivedou materiál do konečného, tedy do vytvrzené podoby. [22, 25]

Takto popsaný proces je znázorněn na Obr. 1.3.1, kde je vidět závislost fází na čase a působícím teple, ve kterém se smíchaný epoxid s tvrdidlem nacházejí.

V důsledku procesu vytvrzování za studena mají epoxidové pryskyřice několik nevýhod oproti typickým pryskyřicím vytvrzovaným teplem, jako je např. dlouhá doba vytvrzování potřebná k získání dostatečných mechanických vlastností (často i několik dnů oproti hodinám vytvrzování epoxidů teplem), neúplná polymerace (okolní teploty mohou způsobovat restart síťovacích reakcí) a teplota skelného přechodu T_g je u těchto pryskyřic často o několik stupňů (o 10 až 20 °C) vyšší, než jsou běžné provozní (okolní) teploty. [23]



Obr. 1.3.1 Vliv okolní teploty na dobu vytvrzování a na stav epoxidové pryskyřice (inspirováno [22])

1.4 Stárnutí materiálu

Odolnost elektrických zařízení je velice závislá na tepelné odolnosti a odolnosti před UV zářením izolačních materiálů, který je v nich obsažen. Tyto odolnosti bývají rozhodujícím faktorem životnosti přístroje. Tepelné a UV namáhání izolačního materiálu vede ke zhoršení elektrických a mechanických vlastností. Během namáhání dochází k narušení struktury, tvaru a stárnutí izolantu. [26]

1.4.1 Tepelné namáhání

Odolnost elektrických zařízení je velice závislá na tepelné odolnosti izolačních materiálů, který je v nich obsažen a bývá rozhodujícím faktorem životnosti přístroje. Tepelné namáhání izolačního materiálu vede ke zhoršení elektrických a mechanických vlastností. Během teplotního namáhání dochází k narušení struktury, tvaru a stárnutí izolantu. [26]

Izolanty jsou rozděleny do tříd podle tepelných odolností. Jejich zařazení se určí zkouškou zrychleného stárnutí. Mechanické pnutí způsobené teplem probíhá během celého teplotního namáhání. Není tomu tedy tak, že se mechanické pnutí v materiálu projeví až po

překročení pevné hranice. Každý materiál je charakterizován materiálovými konstantami A a B a spolu s teplotou T tvoří Montsingerovo pravidlo dáno vztahem (1.4.1) určující délku životnosti izolace τ .

$$\tau = A \cdot e^{B/T} \quad (1.4.1)$$

Závislost životnosti je tedy dána vzhledem ke působící zvyšující se teplotě určena exponenciálně. Při mechanickém nebo tepelném namáhání vzniknou na jeho povrchu trhlinky, které časem způsobí destrukci polymeru. [26]

1.4.2 UV namáhání

Největší vliv na stárnutí polymerů má sluneční záření (fotodegradace). Často je totiž prvotním zahajovatelem degradace, po které může následovat například termooxidací degradace či hydrolyza. [27, 28] Zejména pak má vliv jedna složka, a to UV-B záření. Paprsky ultrafialového záření obvykle poruší vazbu mezi dvěma atomy v řetězci makromolekuly, která se rozpadne na menší celky. [29, 30]

Namáhání UV zářením je často doprovázeno fotooxidací, která je zapříčiněna přístupem kyslíku k materiálu. Tyto reakce začínají vždy na povrchu a postupně se dostávají do větší hloubky, čímž způsobují značné změny v chemické struktuře izolantů. Během fotooxidace v materiálu probíhají fotochemické primární reakce a když je materiál zároveň zahříván, zvyšuje se i rychlost sekundárních reakcí. Celkové poškození těmito třemi vlivy je synergické a je tedy vyšší než součet poškození jednotlivých jevů. [28, 29]

UV, kyslík a vlhkost je další běžná kombinace, která degraduje materiál. Při této kombinaci probíhá difuze vody do materiálu. Voda v materiálu zvětší vzdálenost makromolekulami a tím usnadní difuzi kyslíku do materiálu i odvádění reakčních produktů.

Materiály po těchto stárnutích jsou křehčí a méně pružné. [29, 30]

2 Klíčové elektrické a mechanické parametry a jejich diagnostika

Způsobů, jak hodnotit materiál je velké množství. Mezi klíčové parametry důležité při rozhodování, zda je daný materiál vhodný pro užití v elektrotechnice jsou především vlastnosti elektrické. Mezi nejzákladnější elektrické veličiny, které charakterizují dielektrický materiál, patří vnitřní rezistivita a relativní permitivita.

Mezi mechanické vlastnosti můžeme zařadit pevnost v tahu a relativní prodloužení.

2.1 Relativní permitivita a ztrátový činitel

Relativní permitivity jsou spolu se ztrátovým činitelem jedny z nejdůležitějších materiálových parametrů k hodnocení a srovnání dielektrických látek. Stanovování těchto parametrů nám pomáhá vhodně zvolit jejich aplikační potenciál.

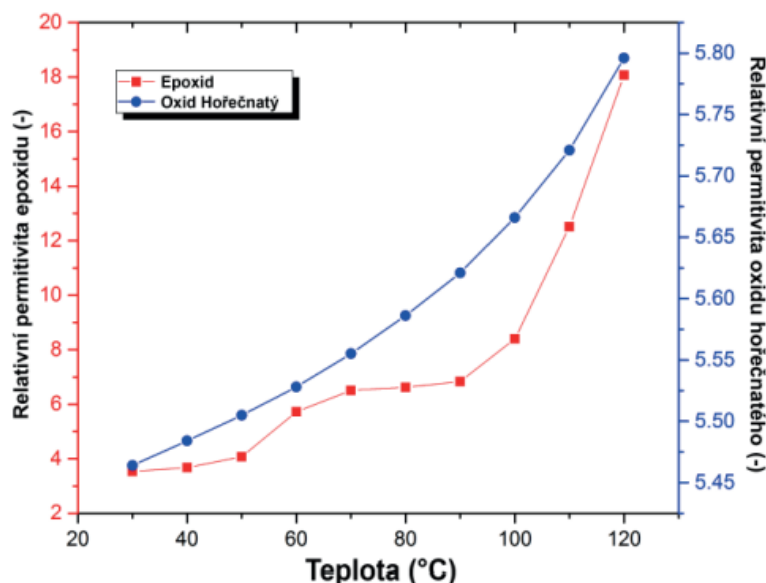
2.1.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita je z makroskopického hlediska jednou z nejdůležitějších veličin charakterizující schopnost polarizace. Polarizací se rozumí děj, který vzniká uvnitř dielektrika po jeho vložení do elektrického pole. Polarizace je velice závislá na struktuře daného materiálu, frekvenci změny elektrického pole a vnějších vlivech, jako je například teplota, vlhkost, nebo tlak. Celková permitivita je dána součinem z permitivity vakua ϵ_0 $8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ a relativní permitivity daného materiálu ϵ_r s hodnotami od 1 (relativní permitivita vakua) až po hodnoty 10^4 . [17] Příklady velikostí relativních permitivit daných materiálů lze vidět v Tab. 2.1.1.

Tab. 2.1.1 Přehled látek a jejich relativních permitivit (převzato z [31])

Látka	Vzduch	Polystyren	Polyester	Papír	EP	Porcelán	Sklo	Křemík
$\epsilon_r (-)$	1	2,5	3	3,7	5	6,5	7,6	12

Dále je relativní permitivita závislá na teplotě materiálu. Platí, že s rostoucí teplotou roste i relativní permitivita, jak je vidět na Obr. 2.1.1.



Obr. 2.1.1 Ukázka teplotní závislost relativní permitivity epoxidu a oxidu hořečnatého [32]

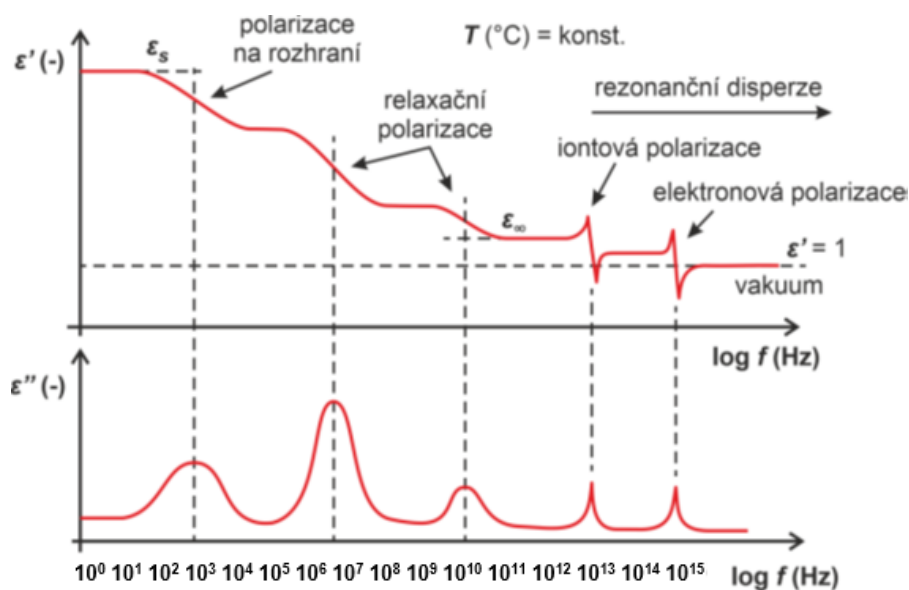
Ve střídavém elektrickém poli však ještě musíme pro následné pochopení ztrátového činitele zavést vedle relativní permitivity ε_r ještě komplexní relativní permitivitu ε^* . Ve střídavém elektrickém poli se totiž projevuje frekvenční závislost relativní permitivity, která je složená z reálné složky ε' a imaginární složky ε'' . Závislost je znázorněna vztahem (2.1.1),

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (2.1.1)$$

kde záporné znaménko mezi složkami dává smysl točení a vzájemný posun vektorů intenzity elektrického pole a elektrické indukce. [17]

Reálná složka je zde vlastní relativní permitivitou a udává míru kapacitního charakteru dielektrika a já tedy stejný význam, jako má relativní permitivita ε_s ve statickém elektrickém poli. Kdyžto imaginární část komplexní relativní permitivity udává míru ztrát vzniklým v dielektriku namáhaném střídavým elektrickým polem. Této složce se také proto říká ztrátová, respektive ztrátové číslo. [17]

Jednotlivé složky jsou na sobě navzájem nezávislé a proměnné dle příslušné frekvence. Průběhy komplexní relativní permitivity lze nadále odhalit i jednotlivé polarizace v materiálu a jejich závislosti na jednotlivých frekvencích, jak je vidět na Obr. 2.1.2.



Obr. 2.1.2 Znáornění průběhů složek komplexní permitivity s vyznačenými druhy polarizací (inspirováno [17])

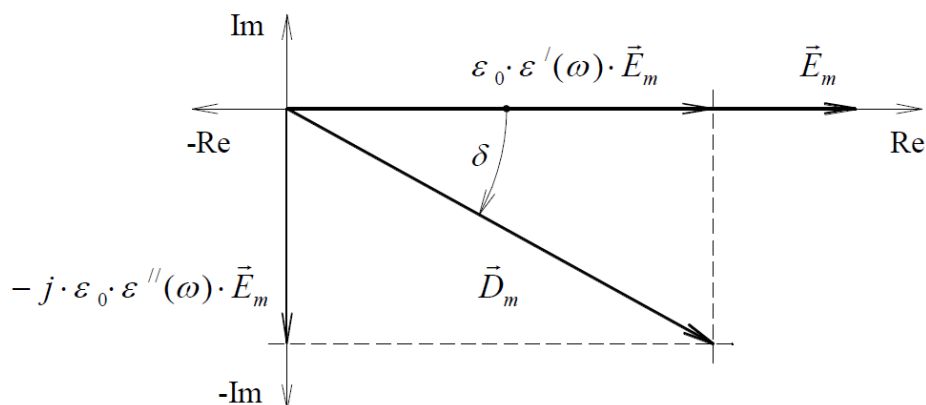
2.1.2 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty udávají, kolik elektrické energie se přemění z přiložené energie do jiné formy energie za určitý čas a v určitém objemu dielektrického materiálu. Velmi často se elektrická energie přemění na tepelnou energii. Ztráty se projevují jak ve střídavém, tak i ve stejnosměrném elektrickém poli, byť ve střídavém poli jsou dielektrické ztráty vlivem imaginární složky relativní permitivity daleko vyšší. [17] V tabulce 2.2 jsou typické hodnoty vybraných materiálů.

Tab. 2.1.2 Přehled látek a jejich ztrátového činitele (převzato z [17])

Látka	Vzduch	Keramika	PVC	Papír	EP
$\text{tg } \delta (-)$	$10^{-5} \div 10^{-6}$	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}

Na ztráty má vliv mnoho faktorů, mezi přední faktory ovlivňující dielektrické ztráty je především frekvence a teplota materiálu. Velikost dielektrických ztrát se vyjadřuje pomocí ztrátového činitele $\text{tg } \delta$. Ztrátový uhel δ je dán úhlem, který mezi sebou svírají jednotlivé složky komplexní relativní permitivity ϵ^* , jak je vidět na Obr. 2.3.

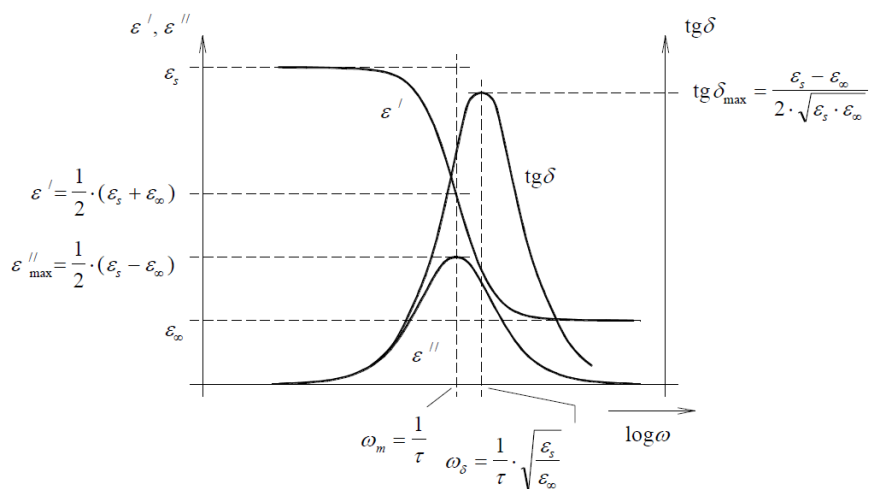


Obr. 2.1.3 Grafické znázornění ztrátového úhlu δ v závislosti jednotlivých složek komplexní relativní permitivity (převzato z [17])

Ztrátový činitel je tedy dán vztahem (2.1.2):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{i\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2.1.2)$$

Ideální bezztrátový materiál, jak je tedy patrné ze vztahu (2.1.2) má tedy nulovou imaginární složku komplexní relativní permitivity. Naopak nejvyšší ztráty lze u materiálu hledat při frekvencích, kdy je vysoká imaginární složka a malá složka reálná. Takový průběh lze vidět na Obr. 2.1.4, kde je zajímavé si všimnout, že nejvyšší ztrátový činitel není při frekvenci, kde se objevuje maximum imaginární složky, ale je při jiné frekvenci. U této frekvence je reálná složka natolik malá, že malý jmenovatel reálné složky ze vztahu (2.1.2) vystřeluje ztrátový činitel do maxima.



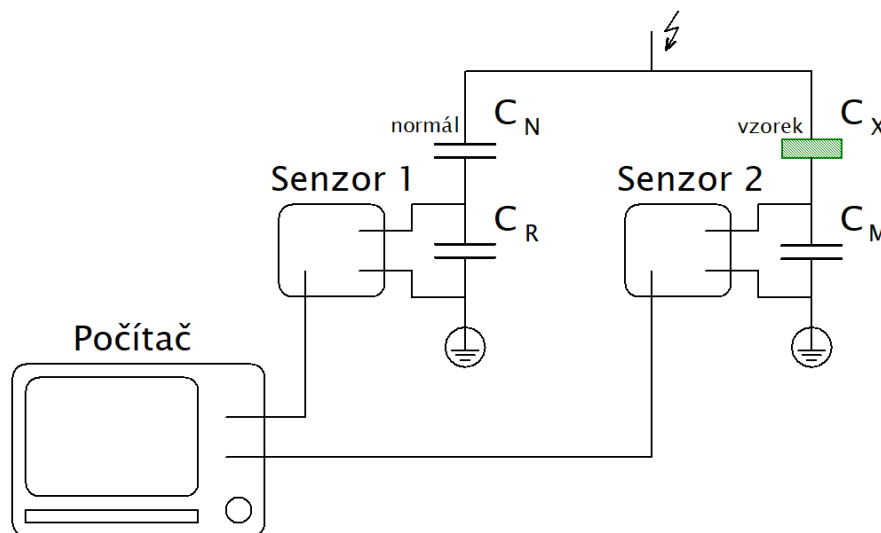
Obr. 2.1.4 Znáorní složek komplexní permitivity a ztrátového činitele při působení střídavého elektrického pole [17]

2.1.3 Diagnostika relativní permitivity a ztrátového činitele

Diagnostikovat relativní permitivitu a ztrátový činitel daného materiálu lze několika způsoby. Nejrozšířenější způsoby jsou pomocí můstků, jako je například Scheringův můstek, či můstek automatický. Můstky jsou založené na postupném nastavení nulového indikátoru do rovnováhy dvou částí. Jedna část je vysokonapěťová a obsahuje kapacitní normál C_N s velmi malým ztrátovým činitelem. Ve druhé nízkonapěťové části se pomocí dekád vyvažuje do doby, kdy je na nulovém indikátoru hodnota 0. [33]

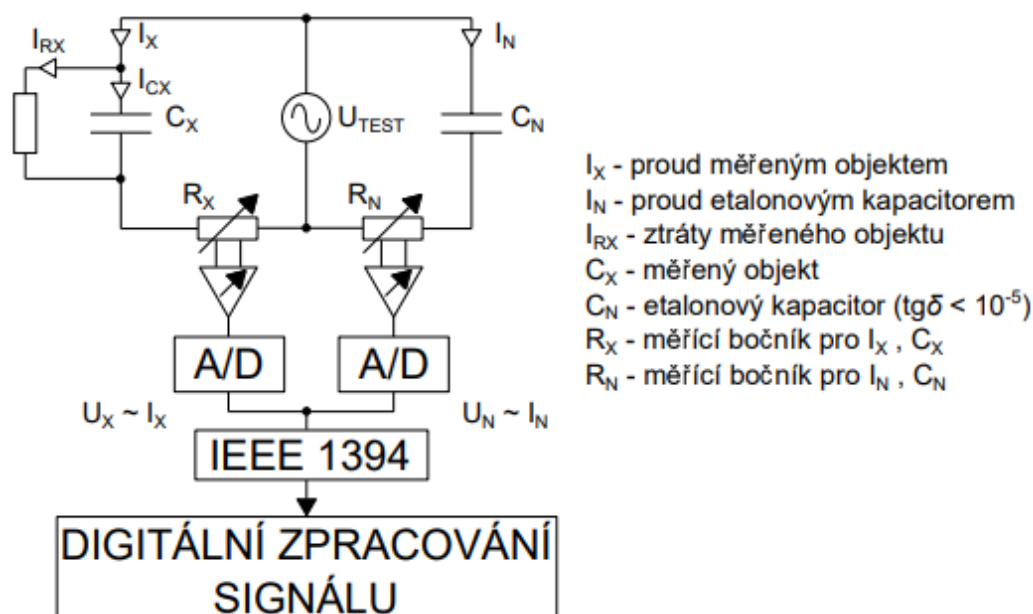
Automatický můstek zobrazený na obrázku 2.1.5 má výhodu, že nemusí pro stanovení velikostí měřených veličin být dokonale vyvážen. Využívá totiž fázového úhlu mezi dílčími napětími C_R a C_M . Pře senzory jsou hodnoty dílčích napětí přeneseny do počítače, kde se signály zpracují a vyhodnotí. Po dosažení znalosti napěťových signálů je dále schopný počítač po vložení základních informací, jako je tloušťka vzorku, schopný stanovit i velikost relativní permitivity. [33]

Automatické můstky jsou schopné pracovat v určitém rozmezí frekvence, které lze zvolit. Většinou se však pohybují v okolí 50 Hz. Při zakomponování vyhřívacích komponentů lze automatické můstky rozšířit o možnost diagnostiky i při různých teplotách působící na materiál. Lze s nimi i měřit vytvrzovací charakteristiky.



Obr. 2.1.5 Automatický můstek (převzato z [33])

Další možností je využití metody dvojitěho vektrometru zobrazeného na obrázku 2.1.6, kde je referenčním kondenzátorem C_N měřen proud I_N a proud I_X kondenzátorem C_X . Obě větve jsou napájeny vestavěným zdrojem a oba proudy jsou měřeny nastavitelnými precizními bočníky a následně digitalizovány. Tato digitalizovaná data jsou následně zpracovávána vestavěným PC. [34]



Obr. 2.1.6 Vektorový můstek (převzato z [34])

Dokonalejším nástrojem pro získání informací o frekvenční závislosti komplexní permitivity v daném materiálu je širokopásmová dielektrická spektroskopie, zkráceně z angličtiny BDS. Jedná se o nedestruktivní metodu schopnou měřit závislosti v rozmezí frekvencí od 10^{-6} až po frekvence 10^{12} Hz, tedy od μHz až po THz. [35]

Omezení pro určité přístroje jsou vysoké frekvence nad 100 kHz, což u BDS není problém. Měřená data nad touto hodnotou jsou velice ovlivněna parazitními vlastnostmi konektorů a kabelů. Proto se pro takto vysoké hodnoty frekvencí u BDS využívají k měření vlnovody či koaxiální kabely. V této technice se měří odrazy ve vedení anebo komplexní konstanty šíření ve vlnovodu. Přístroj je možné rozšířit dalšími technologiemi o řízení teploty o možnost měřit zkoumané veličiny v rozmezích několika stovek $^{\circ}\text{C}$. [35]

Během měření vzorkem prochází proud I_0 vyvolán přiloženým napětím U_0 . Vlivem měřeného vzorku se objevuje fázový posun mezi U_0 a I_0 příslušného fázového úhlu φ . Ze známých hodnot lze určit komplexní impedanci Z^* a ze vztahu (2.1.3) i určit komplexní relativní permitivitu ε^* . Nejdříve se však změří kapacita kondenzátoru bez vloženého měřeného dielektrika mezi elektrody pro stanovení C_0 .

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{-i}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z_{(\omega)}^* \cdot C_0} = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (2.1.3)$$

2.2 Elektrická vodivost a polarizační indexy

Vedle permitivity a ztrátového činitele je rezistivita a polarizační indexy dalšími z řady elektrických veličin, které zkoumáme a kvantifikujeme. Rezistivita a polarizační indexy mají základ v tom, že každý, i nevodivý (tedy i dielektrický), materiál má nějakou určitou vodivost. To znamená, že i dielektrické materiály jsou schopné vést elektrický proud, byť to není žádoucí.

2.2.1 Elektrická vodivost

Jedná se o jev, při kterém se vlivem vnějšího působení elektrického pole rozpohybují nosiče elektrického náboje v látkovém prostředí materiálu. Velikost vodivosti je dána skupenstvím, množstvím a charakterem nosičů elektrického náboje a na struktuře.

U pevných dielektrik rozlišujeme dva druhy elektrické vodivosti. A to vnitřní (objemovou) elektrickou vodivost γ ($S \cdot m^{-1}$) (respektive vnitřní elektrická rezistivita ρ ($\Omega \cdot m$) a povrchovou elektrickou vodivost γ_p (S) (respektive povrchová elektrická rezistivita ρ_p (Ω)). Povrchová vodivost je definována na základě proudu, který je tekoucí po povrchu izolantu a je dána vztahem (2.2.1). Po rozšíření o prostorové uspořádání získáváme vztahy (2.2.2) a (2.2.3) a lze vyvodit, že je povrchová elektrická vodivost závislá na měrném povrchovém odporu R_p . Volné nosiče na povrchu materiálu vznikají disociací molekul nečistot nacházejících se na povrchu dielektrika a je silně podporována absorbovanou vlhkostí z okolí. [17]

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E} \quad (2.2.1)$$

$$\gamma_p = \frac{I}{l_p} \cdot \frac{d}{U} \quad (2.2.2)$$

$$\gamma_p = \frac{d}{R_p \cdot l_p} \quad (2.2.3)$$

Vnitřní elektrická vodivost je dána proudem, který protéká vnitřkem materiálu a je způsobena více druhy vodivostí, jako je například elektronová či iontová. Jedna z těchto je vždy převládající a záleží na intenzitě elektrického pole. Vnitřní elektrická vodivost je dána vztahem (2.2.4). [17]

$$\gamma = \frac{d}{R_{iz} \cdot S} \quad (2.2.4)$$

V praxi se mnohem více osvědčila a využívá se rezistivita ρ , což není nic jiného než převrácená hodnota elektrické vodivosti dle vztahu (2.2.5). V tabulce 2.2.1 je srovnání rezistivit vybraných materiálů.

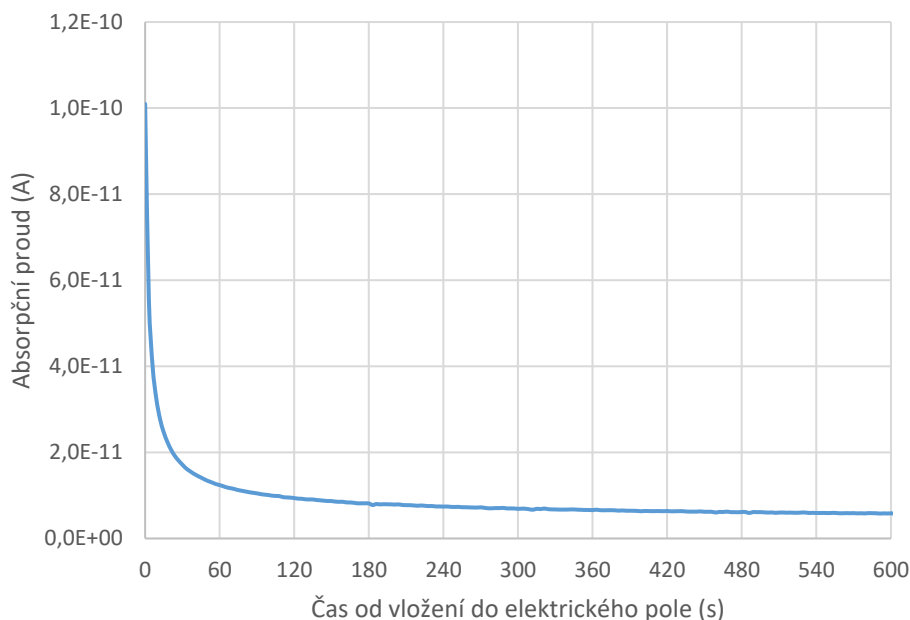
$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2.5)$$

Tab. 2.2.1 Přehled látek a jejich rezistivit (převzato z [17])

Látka	Papír	Sklo	Porcelán	Polyetylen	PVC	Polystyren	Vzduch
ρ ($\Omega \cdot m$)	$10^{10} \div 10^{21}$	$10^{11} \div 10^{16}$	10^{18}	10^{20}	10^{20}	$10^{21} \div 10^{23}$	∞

2.2.2 Polarizační indexy

S elektrickou vodivostí dielektrických materiálů úzce souvisí i polarizační indexy. Tyto indexy jsou dobrými ukazateli stavu dielektrického, respektive izolačního materiálu, které lze získat z absorpčních charakteristik. Ukázka jedné ze změřených absorpčních charakteristik je na obrázku 2.2.1.



Obr. 2.2.1 Příklad změřeného absorpčního proudu vzorkem

Absorpční charakteristiky vycházejí z absorpčních proudů, které jsou časově proměnné a jsou dány polarizačními ději probíhajícími v materiálu po jejich vložení do vnějšího

elektrického pole. Polarizační proudy jsou především vyvolávány relaxačními polarizacemi. Absorpční proud $i_A(t)$ můžeme detekovat například při nabíjení kondenzátoru. Proud v přibývajícím čase klesá a rychlost tohoto poklesu je dána stavem materiálu. A právě časové závislosti absorpčních proudů jsou dobrými ukazateli stavu dané izolace. [17]

Obecně platí, že čím vyšší je hodnota polarizačního indexu, tím je daný materiál lepším izolantem. Jednotlivé stavy kvality lze vyjádřit pomocí tabulky 2.2.2. [36]

Tab. 2.2.2 Stav izolace podle velikosti p_i (převzato z [36])

$p_i(-)$	$\leq 1,0$	1,0 až 2,0	2,0 až 4,0	$\geq 4,0$
Kritérium stavu izolace	špatný	nebezpečný	dobry	výborný

Rozhodujícím číslem je zde číslo 1. Pokud je polarizační index menší než 1, je daný materiál z izolačního pohledu nekvalitní a proud roste s časem a není tedy schopný se vypořádat s účinky vnějšího elektrického pole. Hodnoty nad číslem 1 již tedy ukazují jistou schopnost materiálu se bránit vnějšímu elektrickému poli a hodnoty nad 4 jsou brány jako velice dobré a materiál je velice odolný a přizpůsobivý. Polarizační indexy jsou bezrozměrné. [33]

Rozlišujeme dva polarizační indexy, a to jednodominutový p_{i1} a desetiminutový polarizační index p_{i10} . Jedná se o podíly proudů či odporů v určitých časech, jak již napovídají jejich názvy. Jednodominutový polarizační index je dán poměrem absorpčního proudu detekovaném v patnácté vteřině od vložení materiálu do elektrického pole ku velikosti proudu v šedesáté vteřině znázorněné vzorcem (2.2.6). Respektive podílem odporů materiálu v daných časech dle vzorce (2.2.7). [33]

$$p_{i1} = \frac{i_{A15}}{i_{A60}} \quad (2.2.6)$$

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (2.2.7)$$

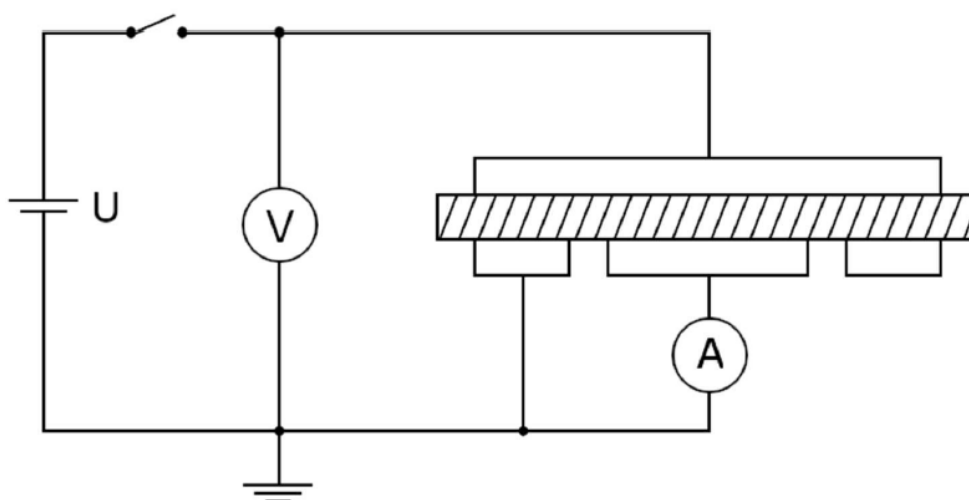
Desetiminutový index je obdobou jednodominutového indexu, zde se však berou časy jedna minuta (60 s) a deset minut (600 s) dle vzorce (2.2.8).

$$p_{i10} = \frac{i_{A60}}{i_{A600}} \quad (2.2.8)$$

2.2.3 Diagnostika elektrické vodivosti a polarizačních indexů

Jak již bylo popsáno výše, vodivosti a polarizační indexy se dají zjistit pomocí proudů, respektive odporů daných vzorků. Pro určení polarizačních indexů stačí znát pouze průběhy proudů protékající materiálem a není potřeba znát geometrické uspořádání daného vzorku. U měření vodivosti, respektive rezistivit je ještě zapotřebí znát včetně proudu i přiložené napětí a geometrii měřícího systému. Je tedy zapotřebí znát jak plochy elektrod při měření daného materiálu, tak také jeho tloušťku.

Je mnoho způsobů, jak změřit vodivost. Nejběžnější metodou je voltampérová metoda, která je přímá a založena na současném měření napětí a proudu. Zapojení lze vidět na obrázku 2.2.2. Před samotným měřením je za potřebí uvést vzorek do stabilního stavu umístěním vzorku do zkratovací knížky po dobu alespoň 24 hodin. Nejpoužívanější je využití stejnosměrného zdroje s napěťovými hladinami 100, 500 či 1000 V. Během měření musí být napěťová hladina, pokud možno velice stabilní. Dále je za potřebí mít velice citlivý ampérmetr, jelikož hodnoty proudů se po určité době ustálí u kvalitních materiálů až u hodnot kolem 10^{-16} A. [17, 33]



Obr. 2.2.2 Blokové schéma voltampérové metody (převzato z [33])

2.3 Mechanické vlastnosti

Včetně elektrických vlastností izolantů k odizolování vodivých částí od sebe anebo ochrany okolí od elektrické energie, plní izolační materiál i funkci mechanické ochrany. Během výroby a následného provozu jsou zařízení tedy namáhány elektricky i mechanicky, například vibracemi, pnutími vyvolané dilatací při tepelných změnách či jinými mechanickými rázy. Ztráty kompaktnosti elektroizolačních částí mohou mít za následek ztrátu elektrických vlastností a vést k poškození zařízení. [17]

Mezi základní diagnostikované vlastnosti jsou pevnost v tahu, v ohybu a rázová houževnatost. Těmito zkouškami se zkoumá elasticita, tažnost, pevnost a houževnatost (respektive křehkost materiálu).

2.3.1 Tahové vlastnosti

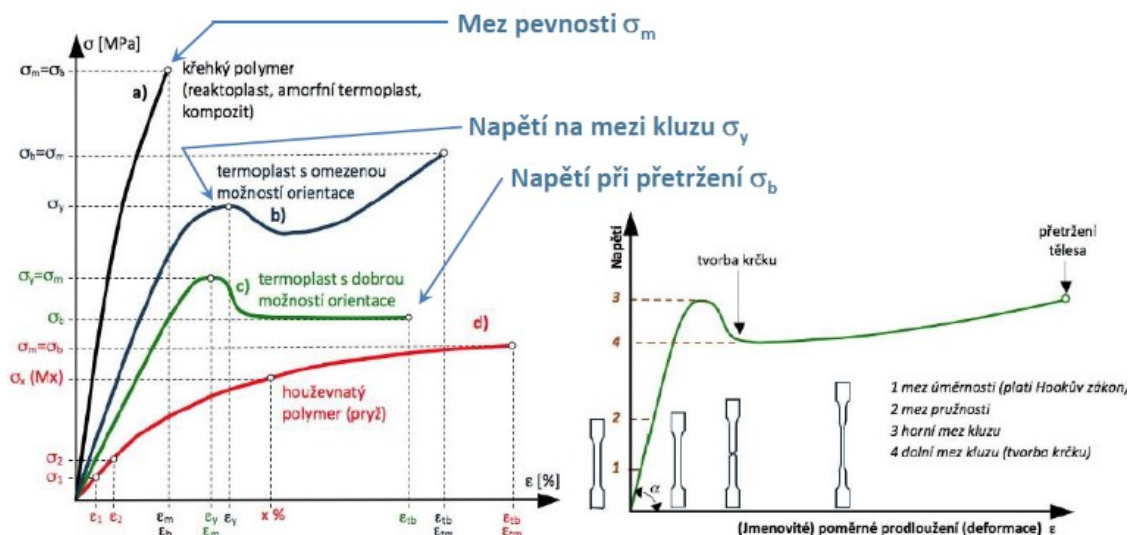
Mezi základní veličinou, která definuje tahové vlastnosti, je mez pevnosti v tahu σ_M . Tato veličina je definována jako maximální napětí v tahu (Pa), kterým je působeno na daný vzorek, než se vzorek přetrhne. Mez pevnosti v tahu je dána vztahem (2.3.1):

$$\sigma_M = \frac{F_{MAX}}{S}, \quad (2.3.1)$$

kde F_{MAX} je maximální síla, která působí na normalizovaný tvar vzorku během měření (často ve chvíli rozlomení vzorku) a S je plocha vzorku.

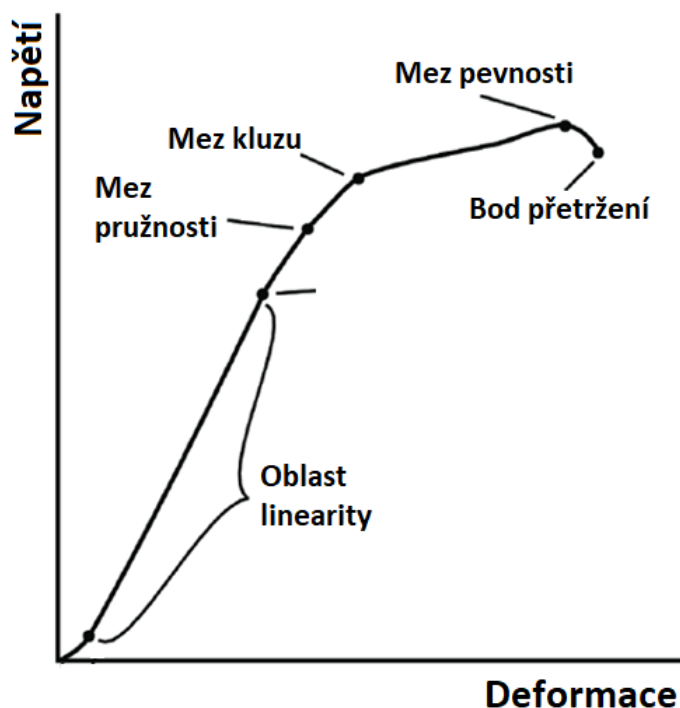
Výstupem tahových zkoušek jsou i deformační křivky reflektující závislost mechanického napětí a deformace. Z těchto křivek lze vyčíst nejen sílu potřebnou pro přetržení vzorku, ale i další zajímavé body, jako je mez kluzu či tvorba krčku (zúžené části při prodloužení vzorku). Při zhodnocení využití daného materiálu pro konkrétní aplikaci je důležité brát v potaz celou křivku a průběhy z nich vypovídající.

Každý druh materiálu má zcela konkrétní průběh deformační křivky, jak je vidět na obrázku 2.3.1. Křehké polymery, mezi které spadají i epoxidové pryskyřice, mají poměrně jednoduchou charakteristiku oproti například termoplastům. Křehké polymery totiž nemají mez kluzu σ_y či mez pružnosti. [37]



Obr. 2.3.1 Ukázka deformačních křivek různých druhů polymerů (převzato z [37])

Mez pružnosti zobrazuje bod, který odděluje vratnou a nevratnou deformaci materiálu. Mez kluzu zase představuje bod, po kterém se materiál začne rychle degradovat (prodloužení a tvorba krčku). Mez kluzu je dobře znatelná u houževnatých materiálů. U křehkých polymerů, stejně jako u všech polymerů můžeme sledovat oblast linearity s mezí linearity. Dále také mez pevnosti a následné přetržení vzorku. Veškeré zajímavé body jsou znázorněné na příkladu deformační křivky na obrázku 2.3.2.



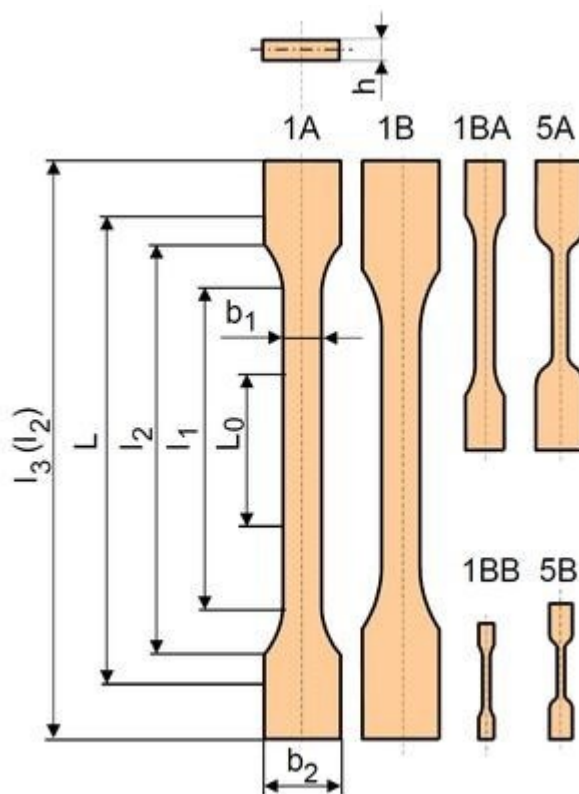
Obr. 2.3.2 Popis zajímavých bodů a oblastí deformační křivky (inspirováno z [37])

2.3.2 Diagnostika tahových vlastností

Tahové zkoušky jsou dělané na zkušebních strojích (trhačkách), které vyvíjejí určitou konstantní rychlost oddalování dvou upínacích čelistí od sebe. Upínací čelisti musí být umístěny tak, aby byly v jedné ose pro osové namáhání vzorků bez žádného působení síly mimo osu vzorku. Měřený vzorek nesmí čelistmi proklouzávat a čelisti nesmí svou upínací silou způsobovat drcení vzorku či předčasný lom. [17]

Siloměr měřící sílu působenou na vzorek musí vyloučit vlivy dány setrvačností a být velice přesný. Maximální přípustná odchylka siloměru je 1% měřené hodnoty síly. Vzhledem k tomu, že mez pevnosti se dle vztahu (2.3.1) stanovuje jak měřenou silou F_{MAX} , tak průřezem vzorku, je pro správné stanovení meze pevnosti potřeba změřit rozměry vzorku s co nejvyšší přesností. Minimální přesnost mikrometru je 0,02 mm. [17]

Tvar měřeného vzorku je normalizovaný a má tvar „lopaticky“ dle obrázku 2.3.3.



Obr. 2.3.3 Tvar vzorků pro tahové zkoušky [38]

Tvar a rozměry pro diagnostiku tahových vlastností plastů jsou dány ISO 527-2. [38] Šířka pásku se pohybuje od 10 mm až po 25 mm s délkou 150 mm. Minimální povolená četnost měření je 5, doporučené je však využití mnohem vyšší četnosti. [17]

3 Praktická část

V praktické části této práce se hodnotí možnost znovuvyužití epoxidových pryskyřic nadrcením a přidáním do nového materiálu v poměru 1%. Plniva jsou z prášků z nestárnuté, ze stárnuté teplem a ze stárnuté UV světlem epoxidové pryskyřice stejného typu. Během praktické zkoušky se stanovují základní elektrické vlastnosti, jako je rezistivita, polarizační indexy, ztrátový činitel a relativní permitivita. Dále se hodnotí z mechanických vlastností mez pevnosti v tahovém zatížení.

3.1 Materiál

K praktické části byla zvolena epoxidová dvousložková čirá zalévací hmota EC141/W241 od dodavatele ELCHEMCo spol s.r.o. Po vytvrzení hmoty je produkt průhledný, vhodný pro použití k zalévání optických prvků bez obsahu UV stabilizátorů, pro výrobu modelů a ochranu různých předmětů. Hmota má dlouhou dobu vytvrzení, přibližně 48 hodin při pokojové teplotě. [39]

System je složen z nízkoviskózní epoxidové pryskyřice EC141 a aminového tužidla W241. Dlouhá doba pro lití i vytvrzení a malý exotermický vzrůst teploty dovoluje zalévat i větší objekty. Na UV světle může hmota žloutnout. Teplota skelného přechodu je dodavatelem stanoven na 45 až 50 °C. [39]

3.1.1 Výroba vzorků

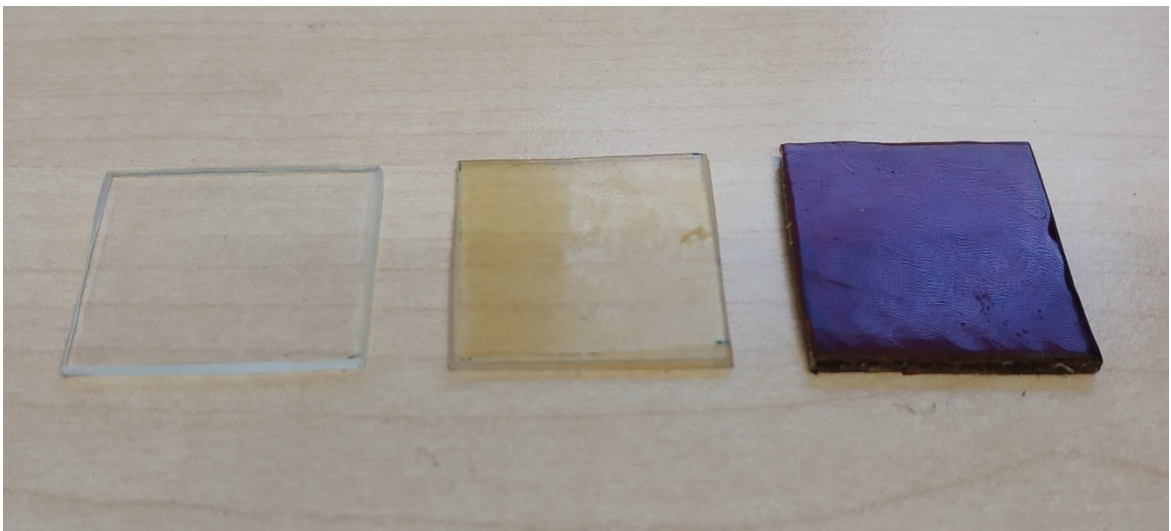
Vzorky vytvrzených epoxidových pryskyřic byly připraveny metodou odlévání pryskyřice. Při této metodě byla do kádinky odebrána známá hmotnost epoxidové pryskyřice. Do kádinky obsahující epoxidovou pryskyřici bylo poté přidáno tvrdidlo. Hmotnostní poměr pryskyřice k tvrdidlu byl udržován na 100:50 podle návodu výrobce. Směs pryskyřice a tvrdidla byla míchána pomocí magnetického tělíska rotující rychlostí 420 ot/min po dobu 2 hodin, než byla směs odlita do forem při teplotě místnosti.

Pro měření elektrických vlastností byly vyrobeny čtvercové silikonové formy podlepené silikonem k zamezení uniku materiálu a měly rozměr takový, aby bylo možné vyrobit vzorky o rozměrech 100 mm × 100 mm × 2 mm. Tloušťky jednotlivých vzorků byly vyrobeny odlišně. Pro měření mechanických vlastností byly vyrobeny formy pro normalizované tvary vzorků pomocí raznice. Práce s touto formou byly obdobné s prací formou pro čtvercové vzorky. Vytvrzená epoxidová pryskyřice byla odebrána z forem po několika dnech po úplném vytvrzení. Vytvrzovací proces je zachycen na Obr. 3.1.1.



Obr. 3.1.1 Fotografie vzorků epoxidových pryskyřic při vytvrzování

Po změření elektrických vlastností na čtvercových vzorcích byly vzorky umístěny do prostředí, které způsobovalo řízené stárnutí materiálů. Jednalo se o laboratorní sušárnu o teplotě 180 °C, kde byla první sada vzorků umístěna po dobu 500 hodin. Druhá sada vzorků byla umístěna do prostoru se třemi 20 W zářivkami (TL20W/12 RS SLV/25, Philips) po dobu 500 hodin. Tyto zářivky generují UV-B záření v rozsahu vlnových délek od 290 nm do 315 nm. Fotografie nestárnuté a dvou stárnutých epoxidových pryskyřic je na Obr. 3.1.2.



Obr. 3.1.2 Fotografie vzorků epoxidových pryskyřic nestárnuté, stárnuté UV světlem a stárnuté teplem

Po změření mechanických vlastností byl materiál ze zničených vzorků odeslán na drcení do Ústavu makromolekulární chemie Akademie věd České republiky. Cílem bylo získat epoxidové pryskyřice ve formě prášku pro další využití. Materiál před drcením je na Obr. 3.1.3.



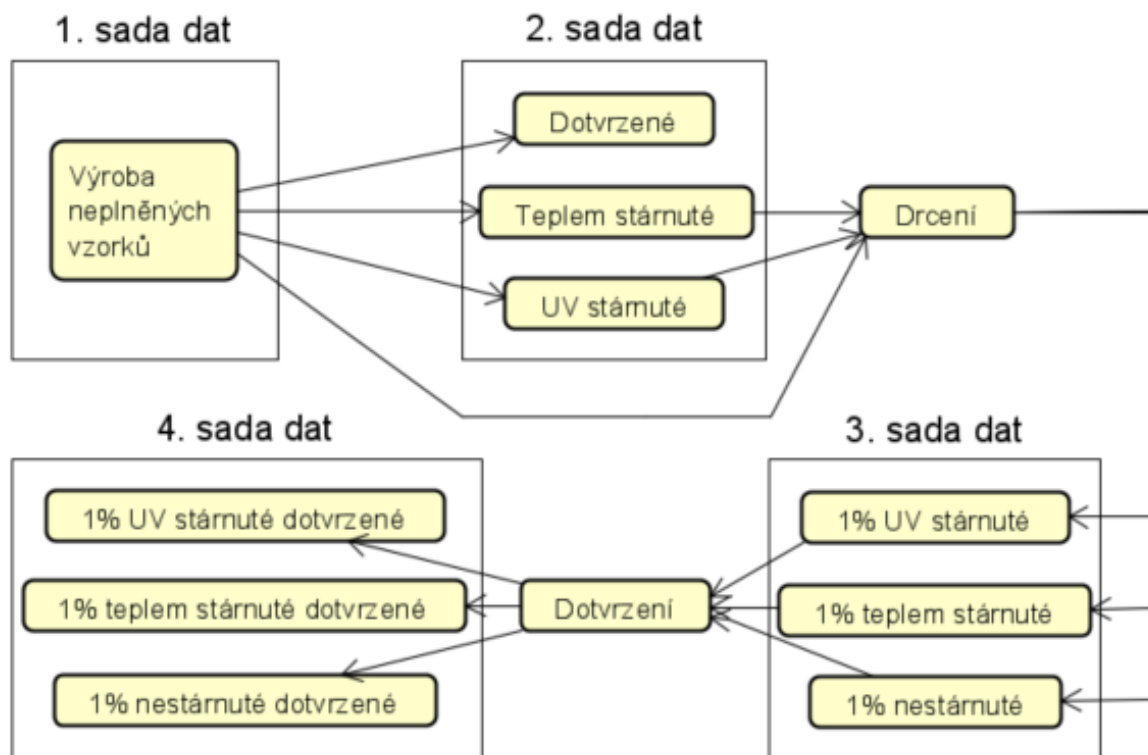
Obr. 3.1.3 Fotografie materiálů před drcením

Zpočátku bylo k nevytvrzené epoxidové pryskyřici přidáno 1% hmotnostní procento množství vytvrzených epoxidových prášků (dodaný stav, UV a teplotně zestárlé). Nevytvrzená epoxidová pryskyřice a prášky vyfocené na Obr. 3.1.4 byly smíchány za použití mechanického míchadla rotujícího rychlostí 420 ot./min po dobu 2 hodin. Následně proběhlo 1 hodinové míchání směsi při 90 ot./min spolu s vývěvou pro vyvážení vzduchových bublin z roztoku. Poté bylo přidáno do epoxidové práškové směsi tvrdidlo a opět 2 hodiny rotující rychlostí 420 ot/min mícháno a posléze nalito a vytvrzeno ve formě při pokojové teplotě.



Obr. 3.1.4 Fotografie získaného prášku před zpracováním

Na Obr. 3.1.5 je pomocí programu Astah vyobrazen diagram popisující postup práce na diplomové práci. Na diagramu je možné pozorovat stavy vzorků při pracovním postupu, během kterých byla získána veškerá zkoumaná data.



Obr. 3.1.5 Diagram popisující pracovní postup při zpracování vzorků

3.1.2 Drcení vzorků

Drcení vzorků bylo realizováno na půdě Ústavu makromolekulární chemie Akademie věd České republiky (ÚMCH AV ČR) na přístroji SPEX SamplePrep, typ 6775 (Freezer/Mill) k vidění na obrázku 3.1.6. Přístroj Freezer/Mill je kompaktní kryogenní mlýn, který pojme vzorky od 0,1 do 5 gramů. Má jednu dvouúčelovou komoru, která předchlazuje a mele vzorky. Přístroj je schopný pojmout jednu malou mlecí lahvičku nebo jednu sadu mikroskopavek. [40]

Ampulka se vzorkem si udržuje kryogenní teplotu díky nepřetržitému ponoření do kapalného dusíku. Tepelně citlivé metabolity, izomery a komplexní molekuly si zachovávají své složení díky stálé teplotě, protože nejsou degradovány teplem nebo tlakem.



Obr. 3.1.6 Fotografie SPEX SamplePrep 6775 Freezer/Mill kryogenního mlýnku [41]

Na přístroji se musí nastavit následující parametry:

- Precooling – doba předchlazení
- Run time – doba mletí
- Cool time – čas mezi mlecími cykly
- Cycles – počet cyklů mletí
- Rate – rychlost nárazového tělesa v cyklech za vteřinu (cps)

Mletí vzorků pracovníci na AV realizovali dvou krokovou metodou ve velké vialce.

1. Precooling 15 min, run time 30 s, cycles 3, cool time 2 min, rate 12 cps.
2. Precooling 2 min, run time 60 s, cycles 3 cool time 2 min, rate 10 cps.

3.2 Použité diagnostické metody

Rezistivita a polarizační indexy byly stanoveny voltampérovou metodou popsanou v kapitole 2.2.3 Diagnostika elektrické vodivosti a polarizačních indexů. K měření byl použit tříelektrodový měřicí systém připojený do KEITHLEY 6517A a řízen počítačem. Použité napětí bylo 1 kV a ustálený stav procházejícího proudu materiálem byl stanoven v čase 3600 s od začátku měření. Na obrázku 3.2.1 je snímek měřicího systému při měření.



Obr. 3.2.1 Fotografie tříelektrodového měřicího systému spojený do KEITHLEY 6517A a řízen počítačem

Pro měření ztrátových činitelů a relativních permitivít byl použit vektorový můstek popsán v kapitole 2.1.3 Diagnostika relativní permitivity a ztrátového činitele. Vektorový můstek byl součástí přístroje Haefely 2830. Měřený vzorek je během měření umístěn do testovací buňky, kde je pod tlakem 6 N/cm^2 upevněn mezi dvěma elektrodami. Měření je prováděno s přiloženým střídavým napětím 1 kV o frekvenci 50 Hz a současně je vzorek mezi elektrodami ohříván na teplotu 80°C . Hodnoty relativních permitivít a ztrátového činitele byly zaznamenány vždy při teplotách násobku 10. Na obrázku 3.2.2 je snímek měřicího systému při měření.



Obr. 3.2.2 Měřicí přístroj Haefely 2830 s testovací buňkou

Dále byl použit přístroj pro stanovení jednotlivých složek relativní permitivity a ztrátového činitele z měření BDS přístrojem od firmy Novocontrol Technologies. U měření BDS se zvolilo frekvenční rozmezí od 0,5 Hz až po 1 MHz a teplota okolí 23 ± 2 °C. Na obrázku 3.2.3 je snímek měřícího systému při měření.



Obr. 3.2.3 BDS měřicí přístroj Novocontrol Technologies při měření

Zkoušky pevnosti v tahu byly realizovány pomocí zkušebního stroje LabTest 3.030 od firmy LaborTech. Tento přístroj umožňuje měřit sílu od jednotek newtonů do 1 kN. Testovány byly vzorky ve tvaru oboustranné lopatičky (dle normy ČSN EN ISO 527-2) a pro posun čelistí zkušebního stroje byla zvolena rychlost 5 mm/min. Na obrázku 3.2.4 je snímek měřicího systému při měření.



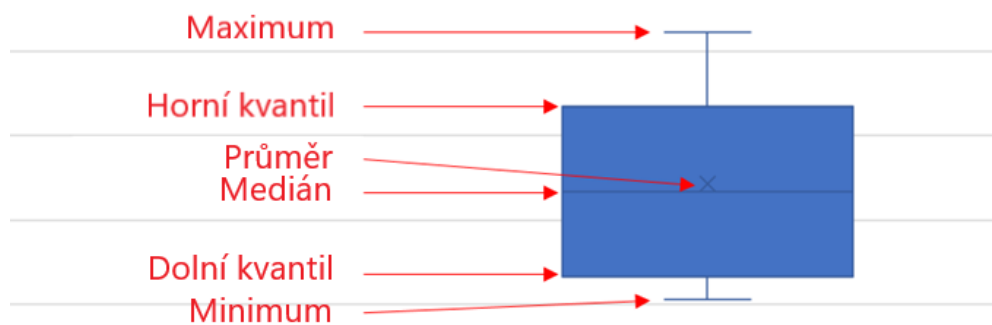
Obr. 3.2.4 Trhací přístroj LabTest 3.030

3.3 Výsledky vyhodnocených dat

Principy jednotlivých zkoumaných vlastností jsou popsány ve druhé kapitole této práce. Veškeré výpočty a grafické ztvárnění závislostí bylo zpracováno v aplikaci MS Excel.

Měření vždy proběhla na více vzorcích daného materiálu a u měření rezistivity, polarizačních indexů a mechanických vlastností proběhla statistická analýza zjištěných parametrů. Ve statistické analýze se stanovily minima (x_{min}), maxima (x_{max}), průměry (\bar{x}), mediány ($\tilde{x}_{0,5}$), směrodatnou odchylku (s_p) a variační koeficienty (V_x). [42]

Pro grafické zobrazení statistického vyhodnocení se vybralo vyjádření pomocí krabicových grafů, které se jinak označují jako boxploty. Tyto grafy umožňují zobrazení statistického analýzy. Boxploty umožňují zobrazit kvantily, minimum, maximum, medián a průměrnou hodnotu. Na obrázku 3.3.1 je k jednotlivým částem boxplotu napsán slovní popis. [43]



Obr. 3.3.1 Obrazové popsání boxplotu [44]

3.3.1 Vyhodnocení vnitřních rezistivit a polarizačních indexů

V Tab. 3.3.1 až Tab. 3.3.10 v této podkapitole jsou vypsané statistické analýzy vnitřních rezistivit ρ_v a polarizačních indexů p_{i1} a p_{i10} všech měření epoxidových pryskyřic. Ve grafických znázorněních Obr. 3.3.2 až Obr. 3.3.7 jsou zobrazeny příslušné analýzy a porovnání vzorků před a po stárnutí a nově vzniklé materiály z 1% plnění různě stárnutých prášků v nedotvrzené i dotvrzené formě. Celé tabulky související s vnitřními rezistivitami a polarizačními indexy jsou v příloze Tab. 6.1 až Tab. 6.10.

Tab. 3.3.1 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů nestárnuté EP

Nestárnutá EP						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
p_{i1} (-)	1,79570	2,33064	2,01852	1,95398	0,16057	7,95502
p_{i10} (-)	1,69317	3,09580	2,11887	1,94685	0,37441	17,67013
R_v (Ω)	1,04E+14	3,83E+14	2,14E+14	2,08E+14	7,10E+13	33,17019
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	1,51E+14	3,16E+14	2,36E+14	2,40E+14	5,57E+13	23,62021

Tab. 3.3.2 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů nestárnuté EP dotvrzené

Nestárnutá EP dotvrzená						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
p_{i1} (-)	2,34561	2,66833	2,49359	2,48022	0,13136	5,26804
p_{i10} (-)	2,90557	3,90886	3,52350	3,63978	0,37606	10,67281
R_v (Ω)	7,30E+14	1,04E+15	8,93E+14	9,01E+14	1,28E+14	14,35902
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	9,05E+14	1,56E+15	1,33E+15	1,43E+15	2,57E+14	19,30174

Tab. 3.3.3 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů UV stárnuté EP

UV stárnutá EP						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
p_{i1} (-)	2,42371	2,65795	2,49589	2,46954	0,08357	3,34813
p_{i10} (-)	3,02404	3,25438	3,11151	3,07409	0,08050	2,58706
R_v (Ω)	6,86E+14	1,03E+15	8,83E+14	8,91E+14	1,35E+14	15,32845
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	8,70E+14	1,01E+15	9,34E+14	9,34E+14	4,90E+13	5,24962

Tab. 3.3.4 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů teplem stárnuté EP

Teplem stárnutá EP						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
ρ_{i1} (-)	2,24467	2,43842	2,34424	2,36386	0,06789	2,89587
ρ_{i10} (-)	2,95239	3,41506	3,18207	3,20258	0,15619	4,90846
R_v (Ω)	8,07E+14	1,25E+15	1,00E+15	9,78E+14	1,45E+14	14,47262
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	8,11E+14	1,02E+15	9,14E+14	9,31E+14	8,15E+13	8,92037

Tab. 3.3.5 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% EP

1% plnění nestárnuté EP						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
ρ_{i1} (-)	2,15172	2,50658	2,35763	2,45077	0,15148	6,42517
ρ_{i10} (-)	2,80396	3,94442	3,29780	3,41791	0,43255	13,11623
R_v (Ω)	3,02E+14	6,29E+14	5,04E+14	5,51E+14	1,11E+14	22,01351
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	3,64E+14	7,23E+14	5,63E+14	5,48E+14	1,41E+14	25,06076

Tab. 3.3.6 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% EP dotvrzené

1% plnění nestárnuté EP dotvrzená						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
ρ_{i1} (-)	1,84072	2,33726	2,19000	2,29102	0,20301	9,26974
ρ_{i10} (-)	2,36934	3,16525	2,85371	2,94013	0,31165	10,92091
R_v (Ω)	2,92E+14	5,45E+14	4,27E+14	4,35E+14	9,11E+13	21,35350
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	3,46E+14	5,43E+14	4,41E+14	4,37E+14	9,16E+13	20,78300

Tab. 3.3.7 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% plněné UV stárnuté EP

1% plnění UV stárnutou EP						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
ρ_{i1} (-)	2,21154	2,43304	2,30372	2,24120	0,09188	3,98837
ρ_{i10} (-)	2,54325	3,06576	2,76256	2,70321	0,17676	6,39852
R_v (Ω)	1,50E+14	3,44E+14	2,49E+14	2,42E+14	6,79E+13	27,21901
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	2,09E+14	4,62E+14	3,17E+14	3,15E+14	8,55E+13	26,96639

Tab. 3.3.8 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% plněné UV stárnuté EP dotvrzené

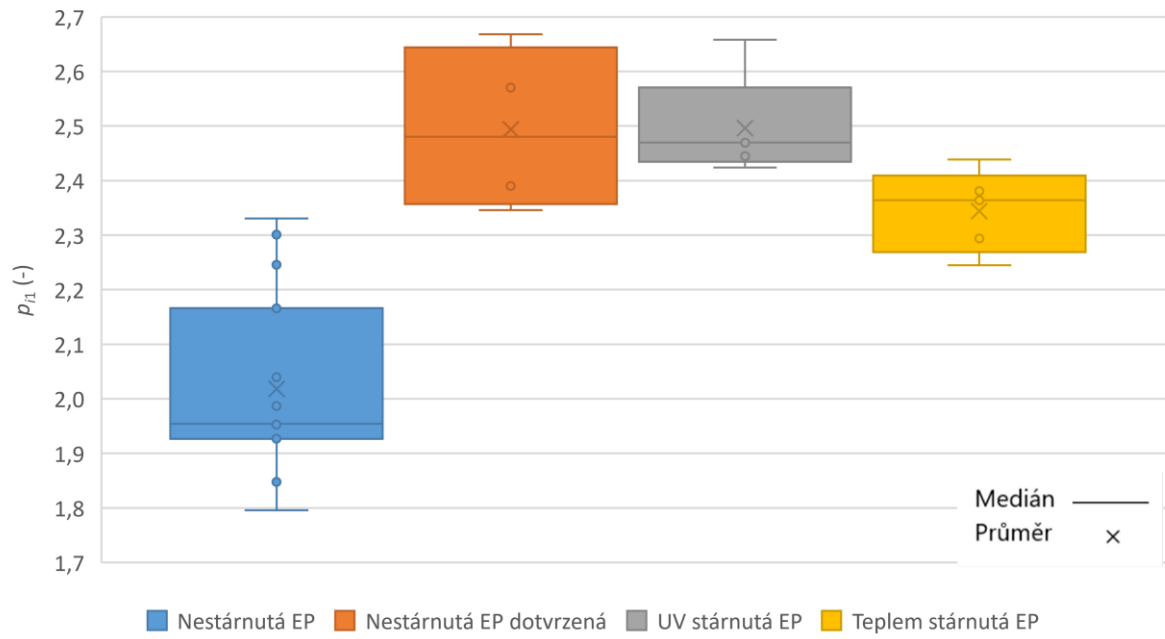
1% plnění UV stárnutou EP dotvrzená						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
ρ_{i1} (-)	2,08374	2,18379	2,13163	2,12949	0,03601	1,68950
ρ_{i10} (-)	2,32469	2,47104	2,40470	2,41153	0,06355	2,64275
R_v (Ω)	2,11E+14	2,89E+14	2,41E+14	2,31E+14	3,16E+13	13,12184
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	2,87E+14	4,04E+14	3,23E+14	3,01E+14	4,71E+13	14,56601

Tab. 3.3.9 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% plněné teplem stárnuté EP

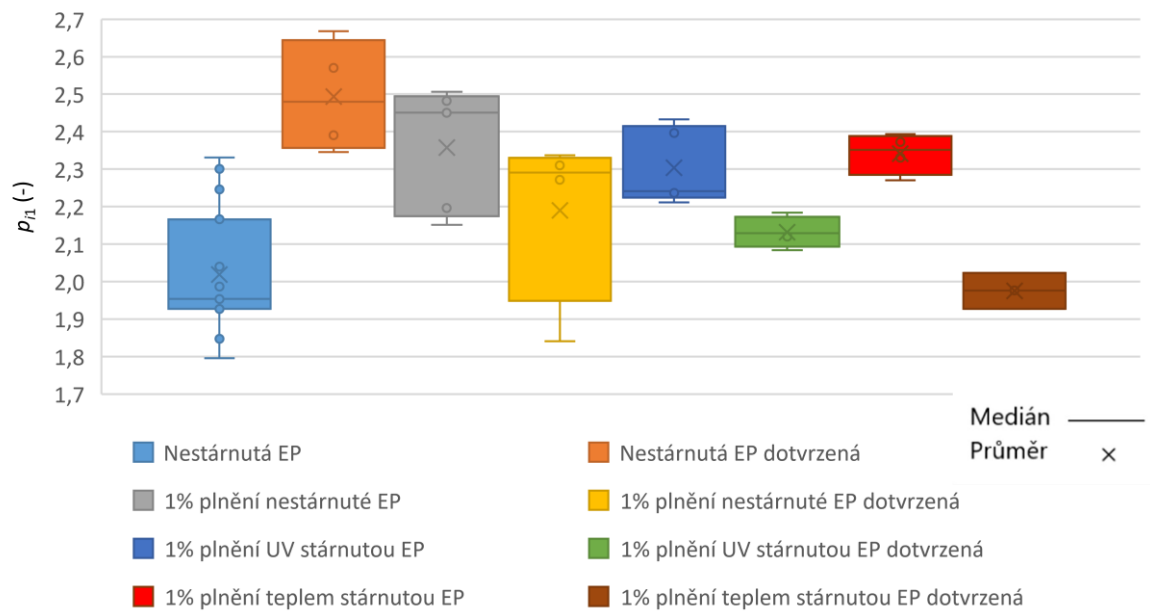
1% plnění teplem stárnutou EP						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
ρ_{i1} (-)	2,26998	2,39332	2,34155	2,35146	0,04711	2,01175
ρ_{i10} (-)	2,65720	2,99139	2,85691	2,88952	0,13584	4,75485
R_v (Ω)	2,15E+14	3,66E+14	3,05E+14	3,19E+14	6,26E+13	20,56493
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	2,85E+14	4,27E+14	3,56E+14	3,57E+14	6,23E+13	17,49230

Tab. 3.3.10 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% plněné teplem stárnuté EP dotvrzené

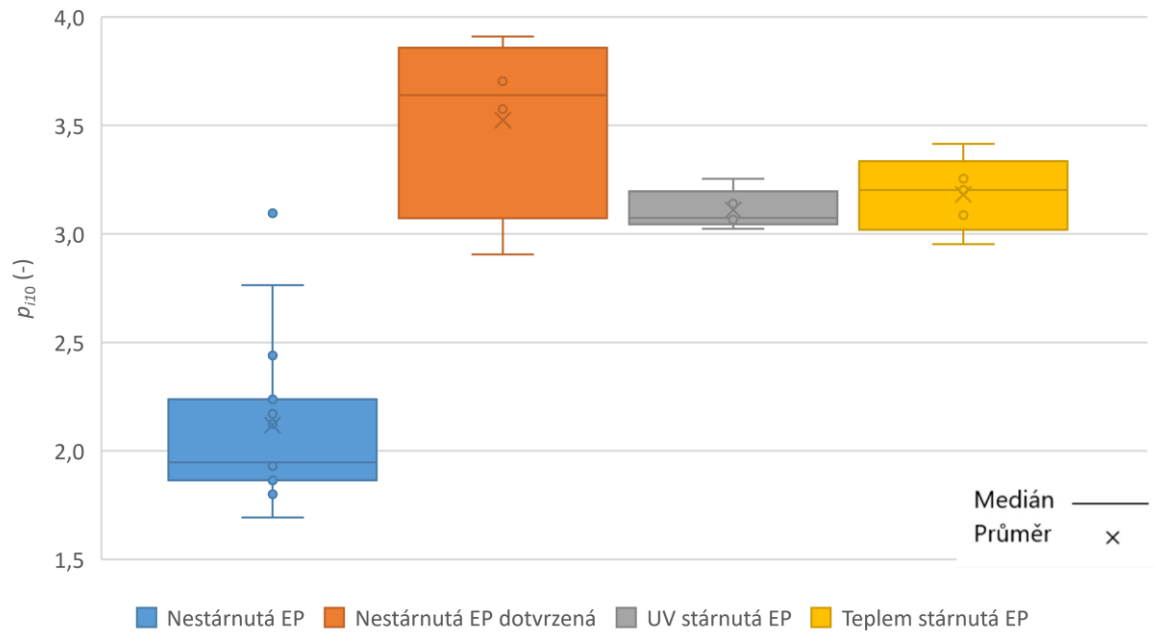
1% plnění teplem stárnutou EP dotvrzená						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
ρ_{i1} (-)	1,92695	2,02303	1,97534	1,97604	0,03923	1,98591
ρ_{i10} (-)	2,14188	2,45536	2,25623	2,17147	0,14132	6,26344
R_v (Ω)	1,41E+14	1,60E+14	1,49E+14	1,47E+14	8,11E+12	5,43735
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	1,64E+14	1,76E+14	1,69E+14	1,67E+14	5,25E+12	3,10505



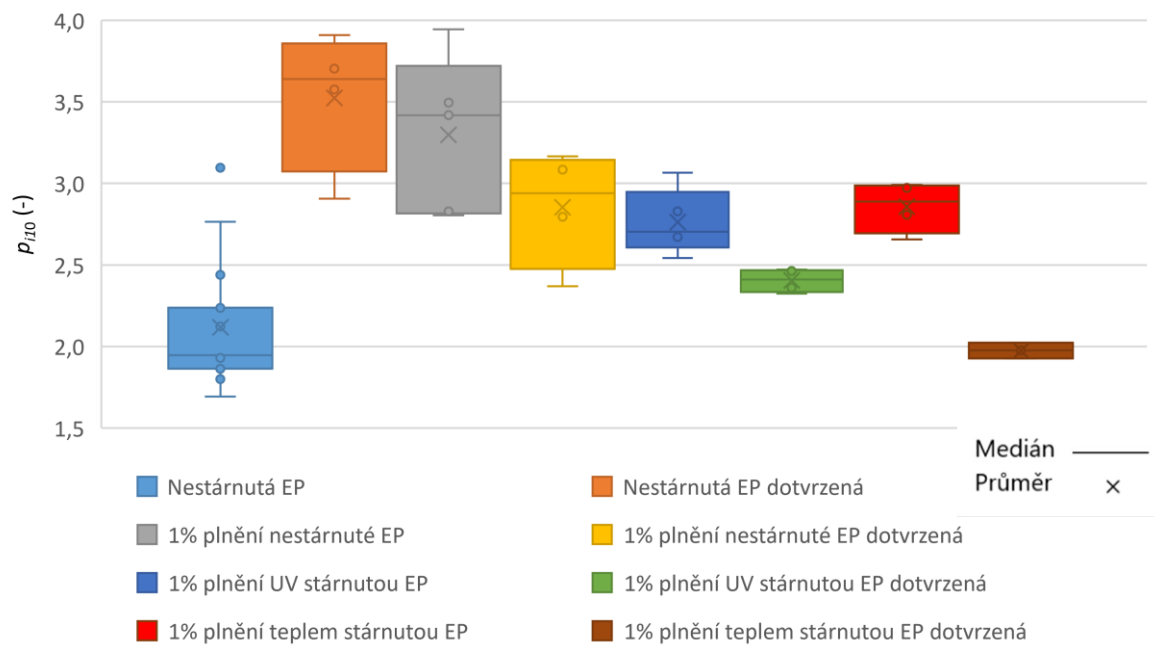
Obr. 3.3.2 Grafické zobrazení četností jednodominutových polarizačních indexů EP bez plnění



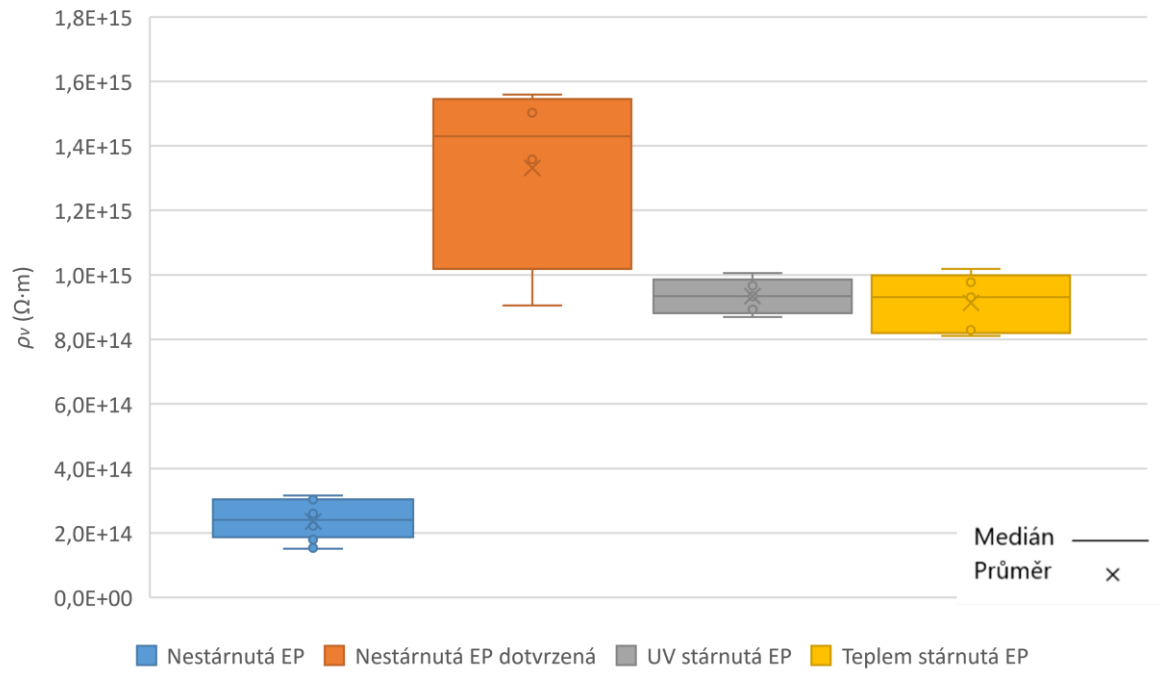
Obr. 3.3.3 Grafické zobrazení četností jednodominutových polarizačních indexů nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním



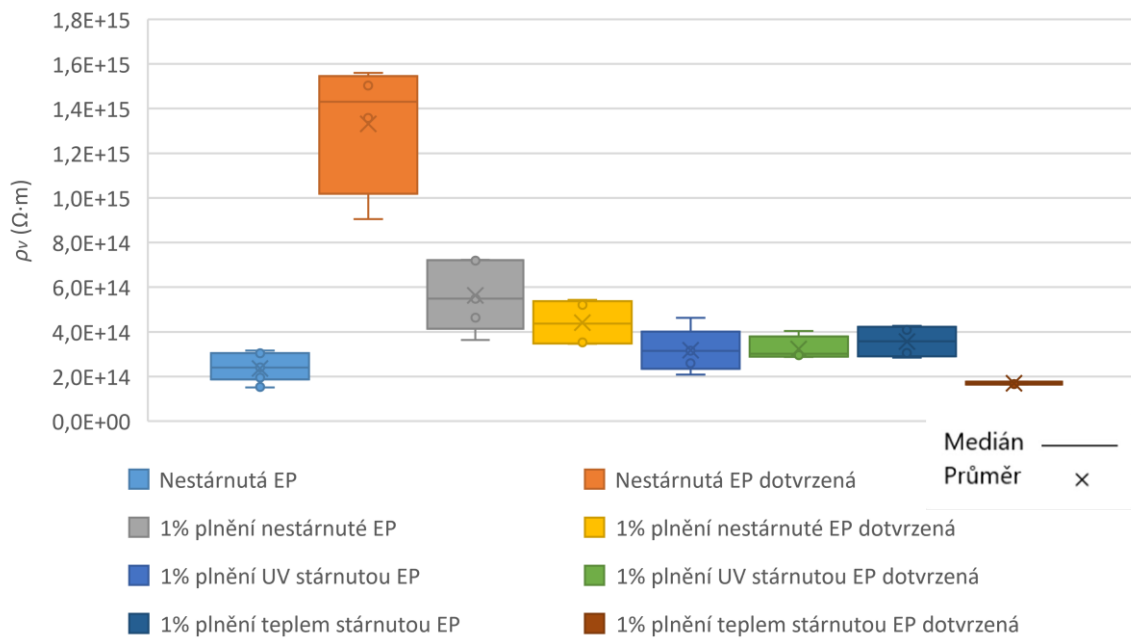
Obr. 3.3.4 Grafické zobrazení četností desetiminutových polarizačních indexů EP bez plnění



Obr. 3.3.5 Grafické zobrazení četností desetiminutových polarizačních indexů nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním



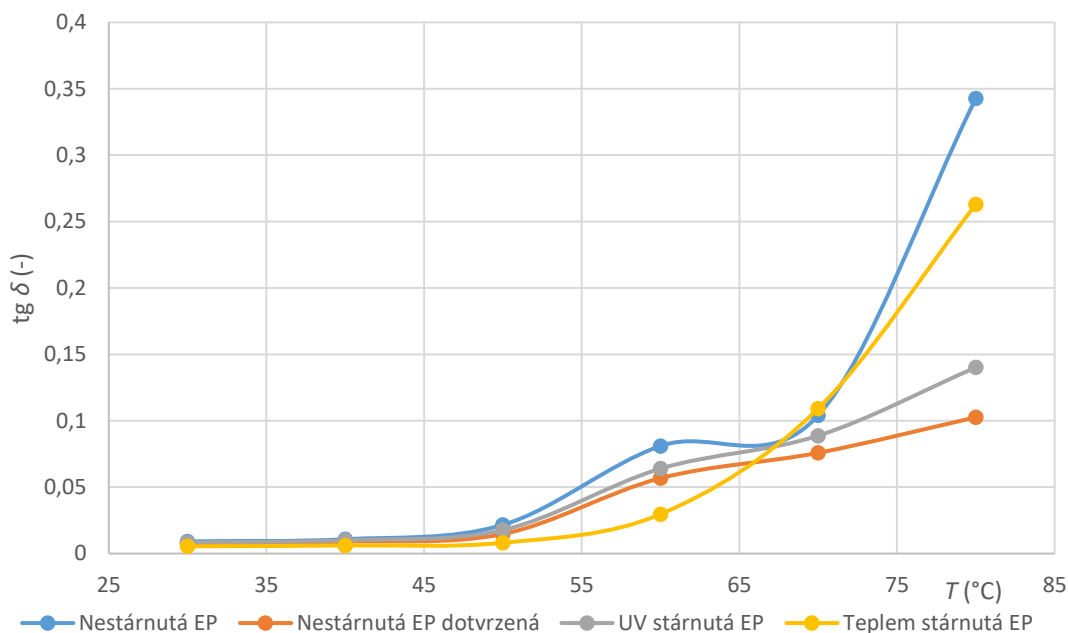
Obr. 3.3.6 Grafické zobrazení četností vnitřních rezistivit EP bez plnění



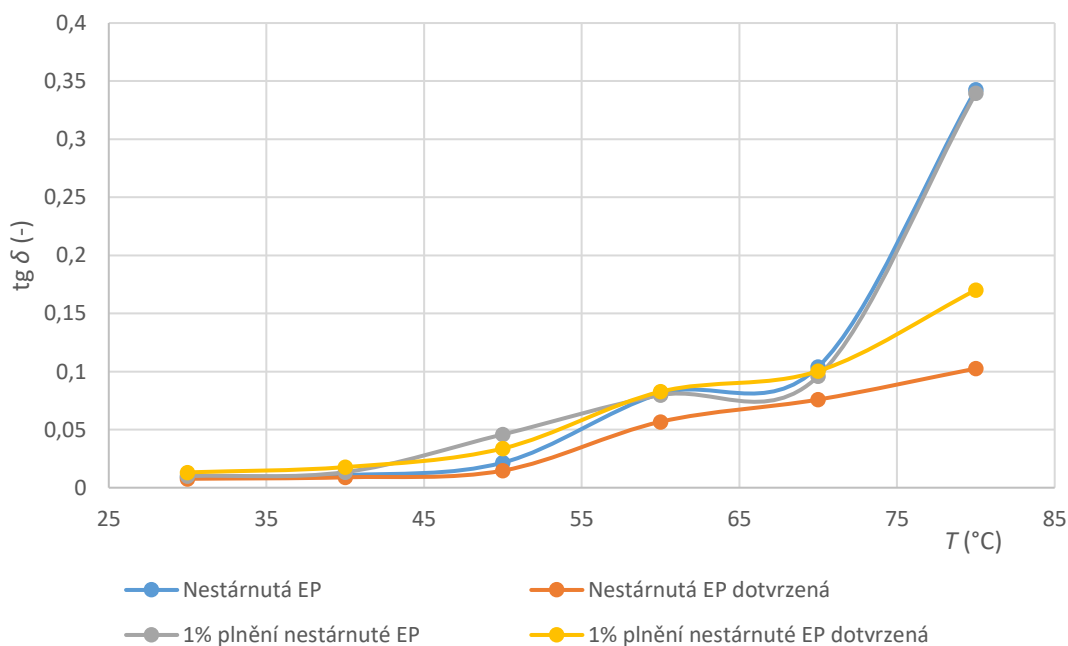
Obr. 3.3.7 Grafické zobrazení četností vnitřních rezistivit nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním

3.3.2 Vyhodnocení ztrátových činitelů

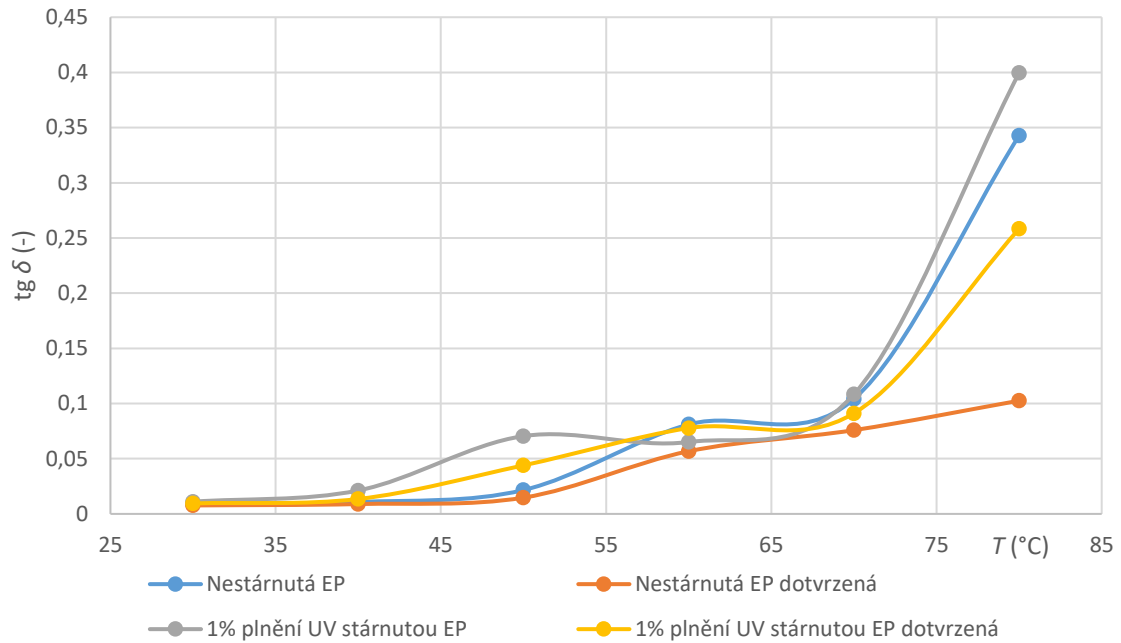
Ve grafických znázorněních v této podkapitole od 3.3.8 až po 3.3.14 jsou zobrazeny příslušné závislosti ztrátových činitelů $\text{tg } \delta$ na teplotě T při konstantní frekvenci 50 Hz a na frekvenci f od 0,5 Hz až po 1 MHz při teplotě okolí 23 ± 2 °C. Jsou zde porovnány vzorky před a po stárnutí a nově vzniklé materiály z 1% plnění různě stárnutých prášků v nedotvrzené i dotvrzené formě. Tabulky naměřených dat jsou k dispozici v příloze této práce od Tab. 6.11 až po Tab. 6.23.



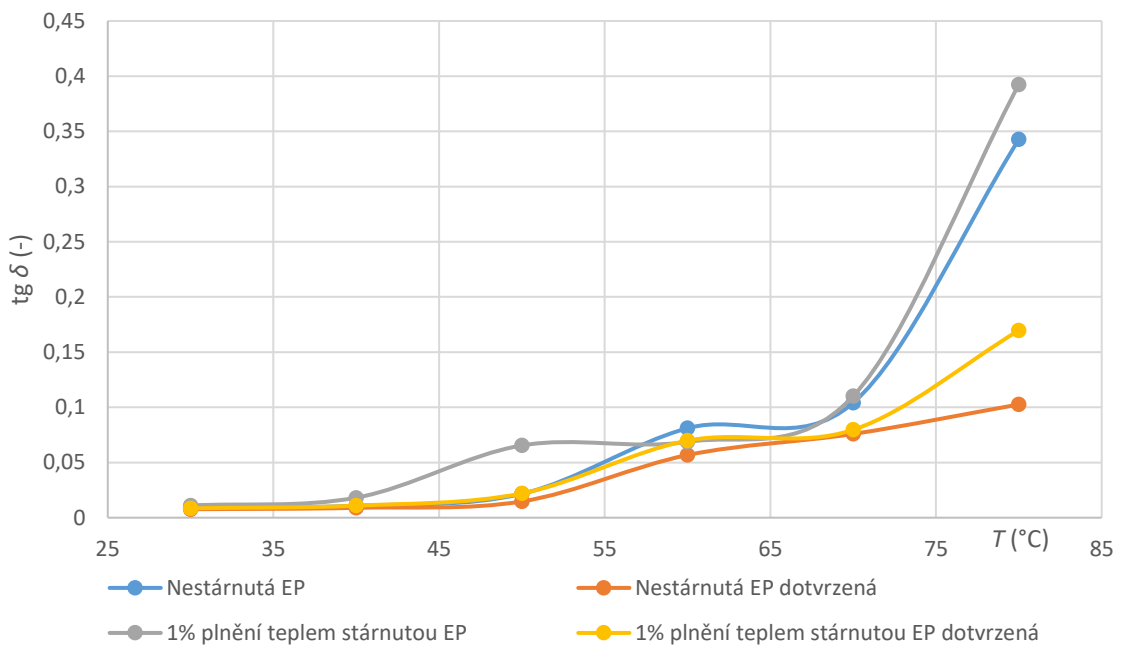
Obr. 3.3.8 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na teplotě nestárnutých a stárnutých EP



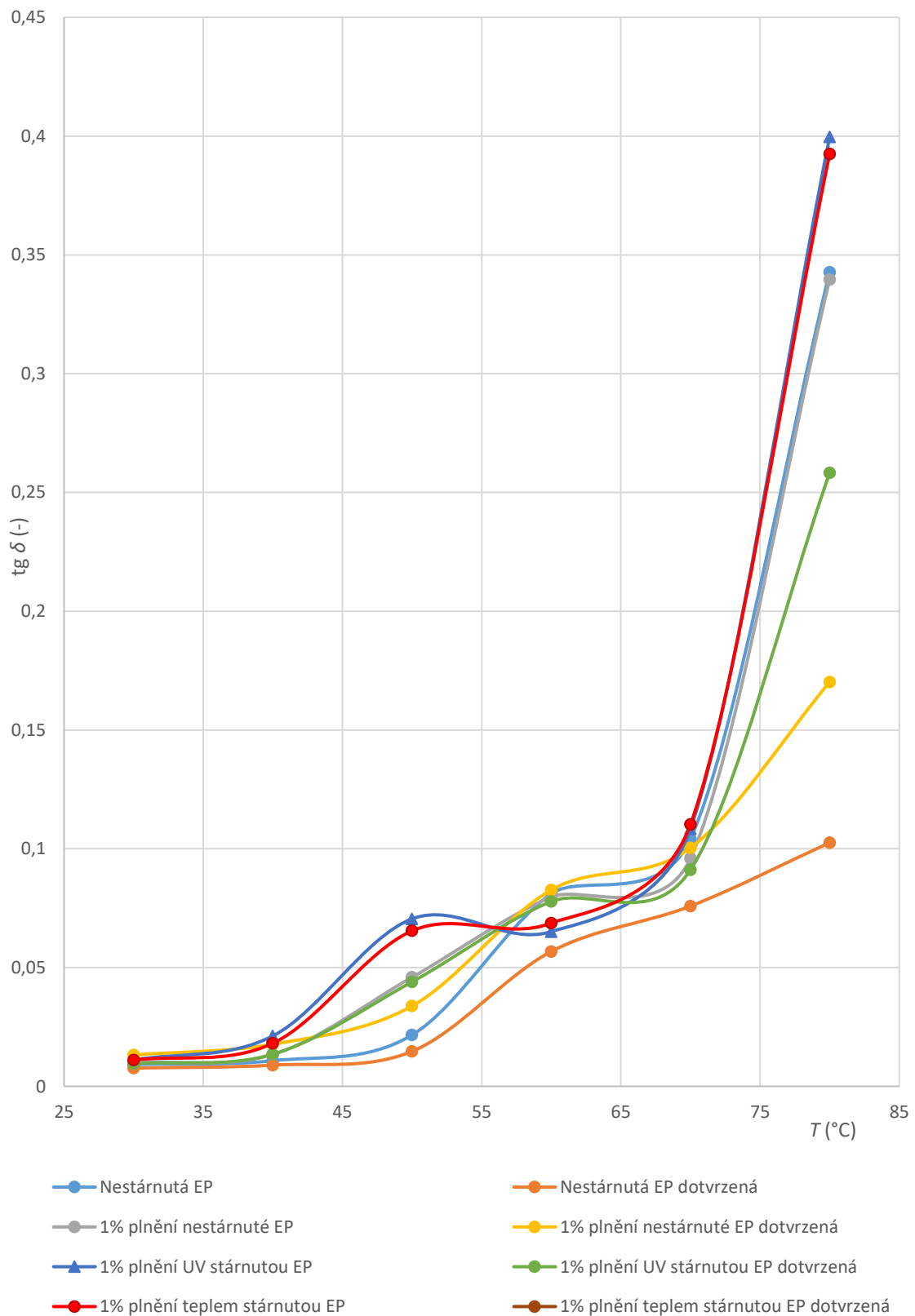
Obr. 3.3.9 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% nestárnutým plněním



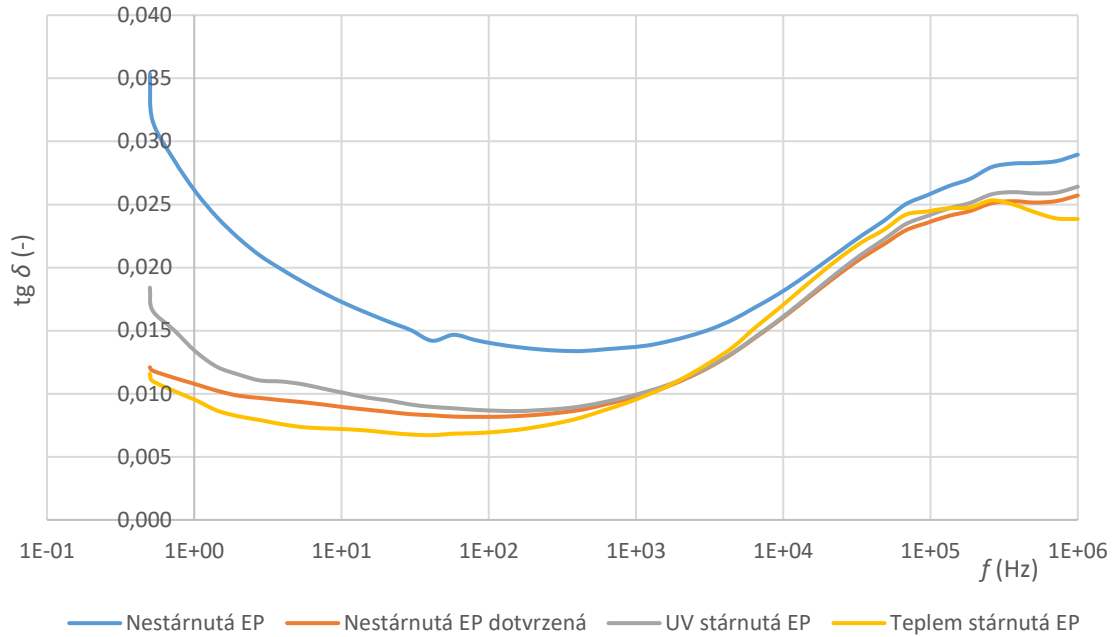
Obr. 3.3.10 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% UV stárnutým plněním



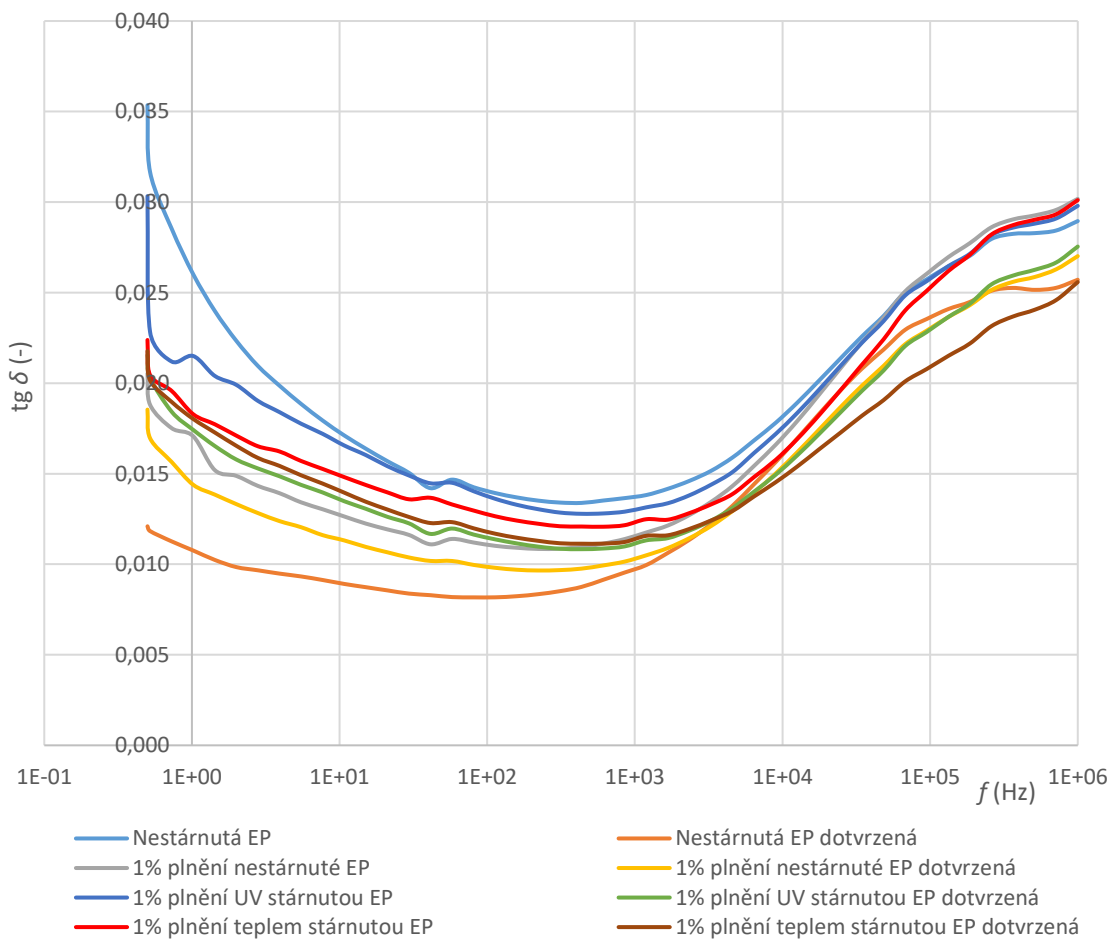
Obr. 3.3.11 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% UV stárnutým plněním



Obr. 3.3.12 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním



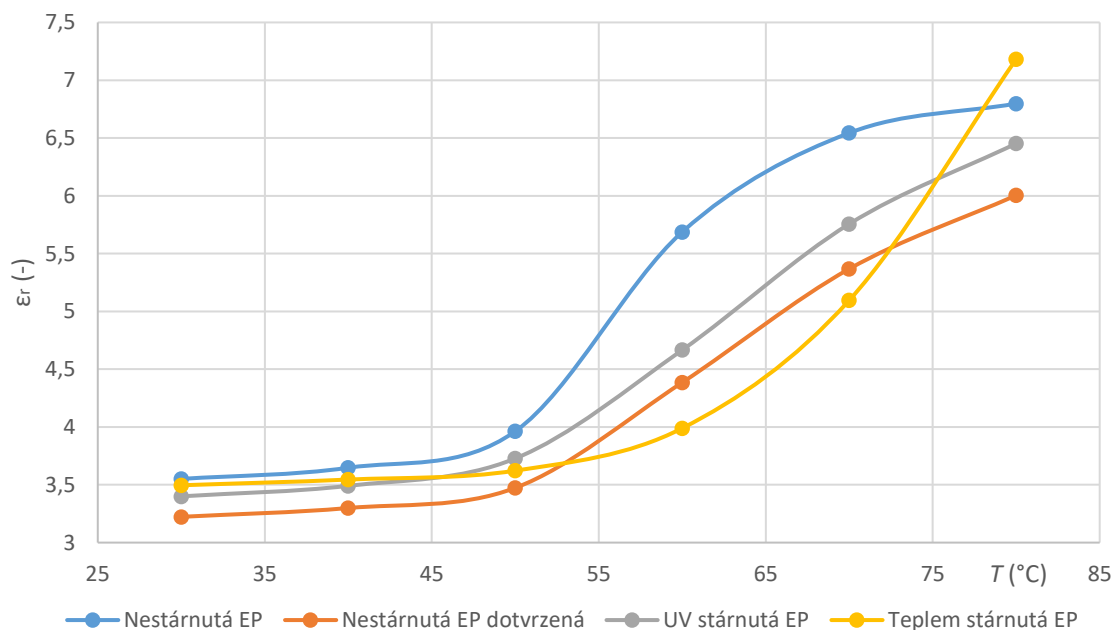
Obr. 3.3.13 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na frekvenci nestárnutých a stárnutých vzorků EP



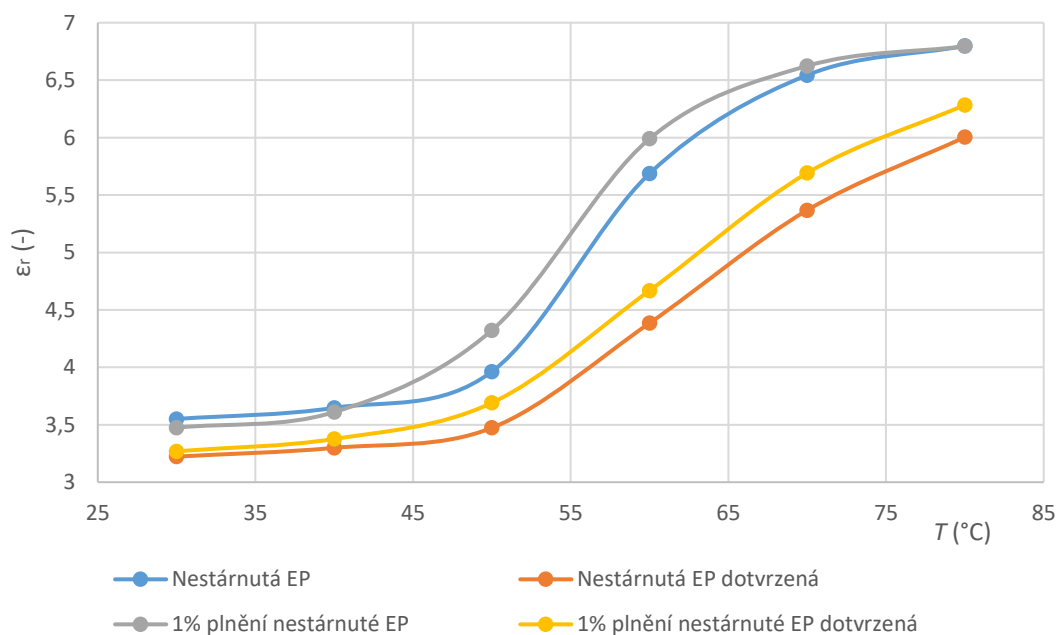
Obr. 3.3.14 Grafické zobrazení závislosti reálné složky relativní permitivity na frekvenci nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním

3.3.3 Vyhodnocení relativních permitivit

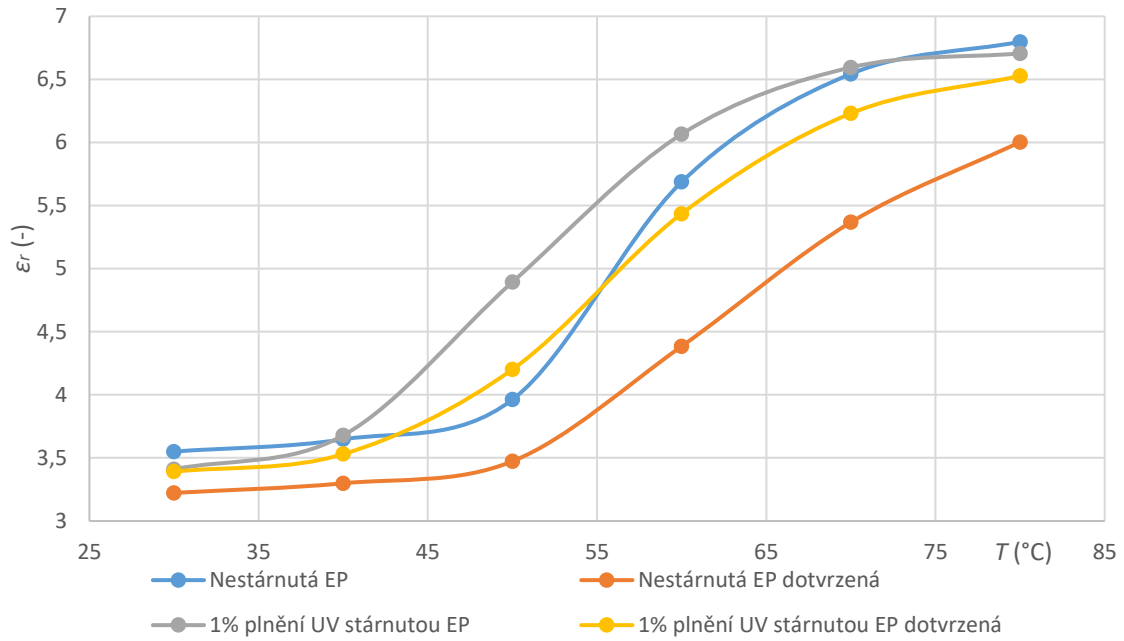
Ve grafických znázorněních v této podkapitole od 3.3.15 až po 3.3.21 jsou zobrazeny příslušné závislosti relativních permitivit ε_r na teplotě T při konstantní frekvenci 50 Hz a na frekvenci f od 0,5 Hz až po 1 MHz při teplotě okolí 23 ± 2 °C. Jsou zde porovnány vzorky před a po stárnutí a nově vzniklé materiály z 1% plnění různě stárnutých prášků v nedotvrzené i dotvrzené formě. Tabulky naměřených dat jsou k dispozici v příloze této práce od Tab. 6.21 až po Tab. 6.33.



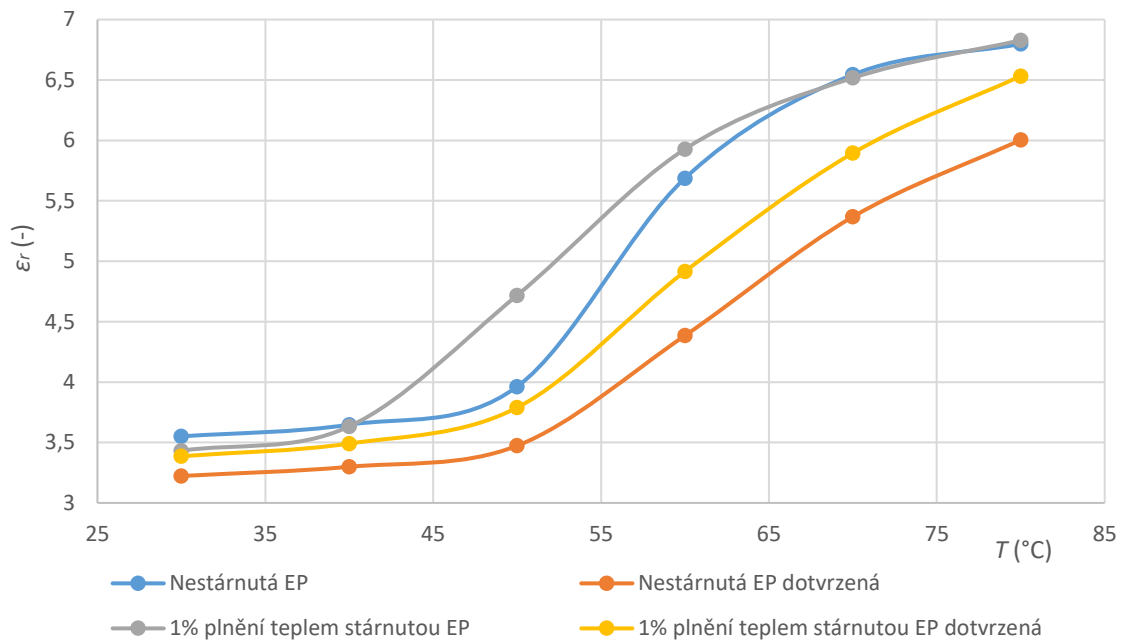
Obr. 3.3.15 Grafické zobrazení závislosti relativních permitivit na teplotě nestárnutých a stárnutých EP



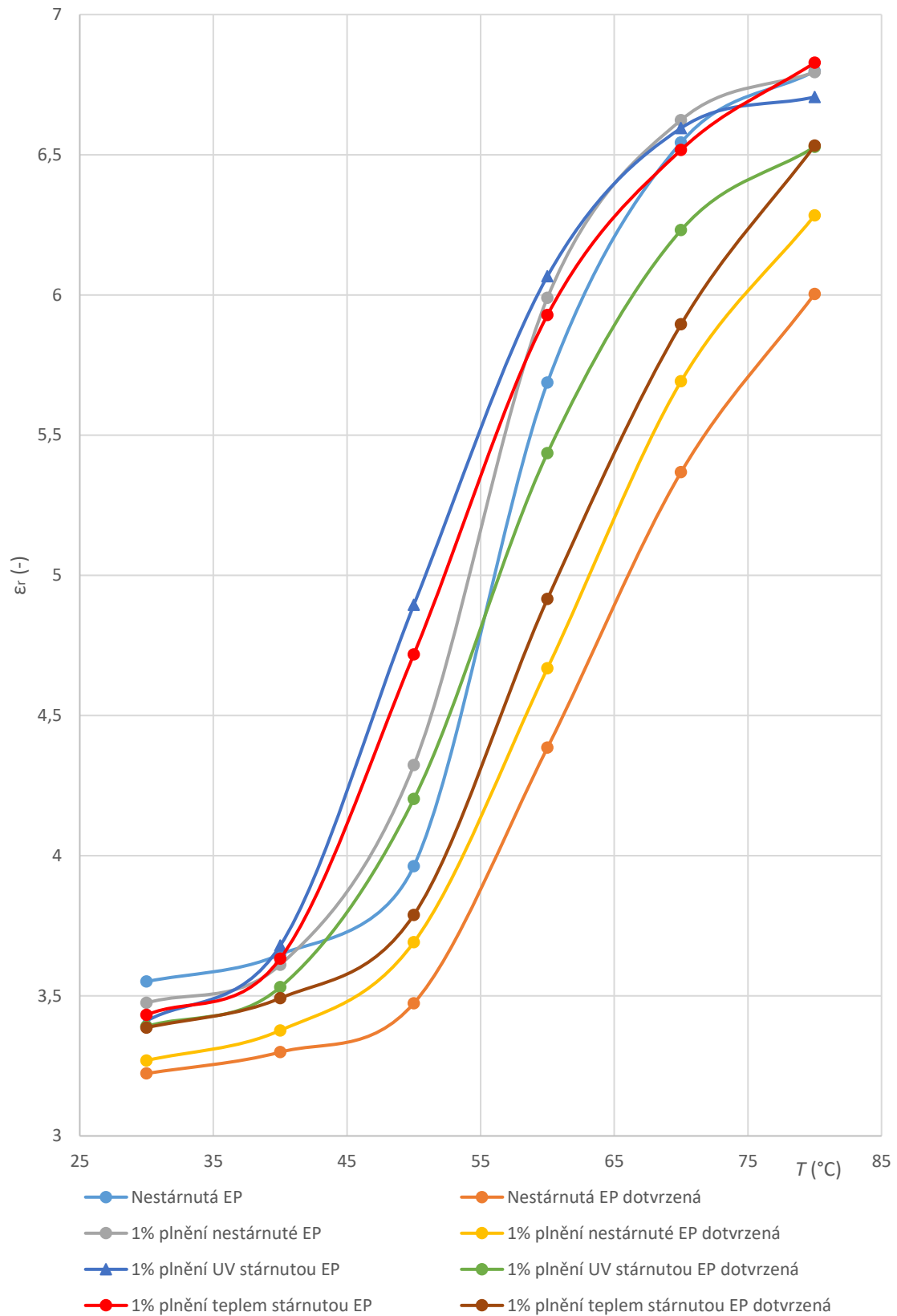
Obr. 3.3.16 Grafické zobrazení závislosti relativních permitivit na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% nestárnutým plněním



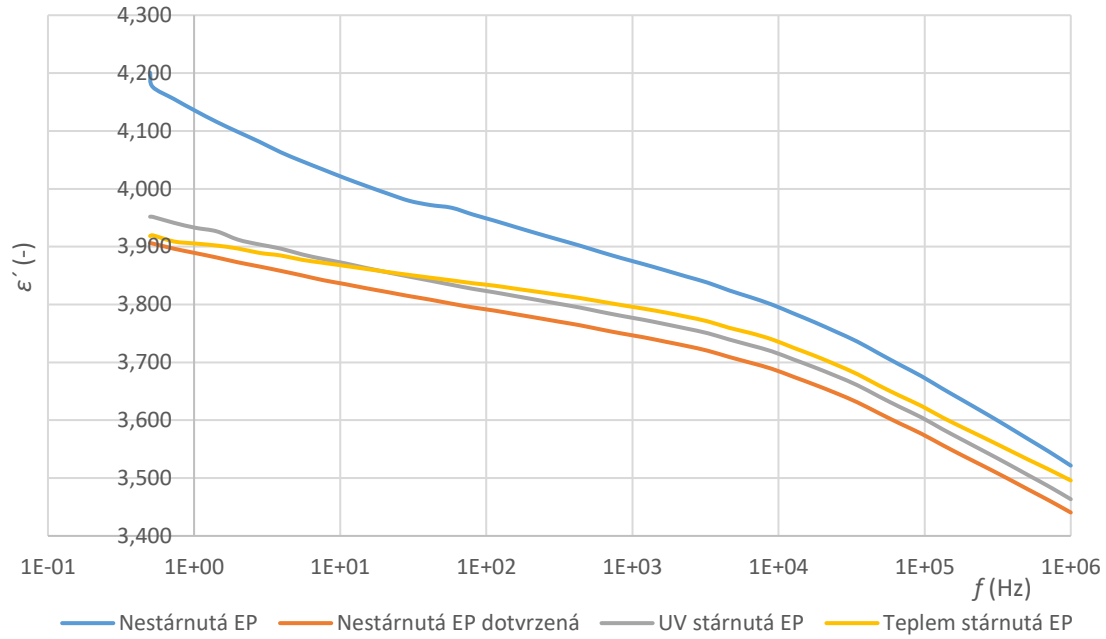
Obr. 3.3.17 Grafické zobrazení závislosti relativních permitivit na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% UV stárnutým plněním



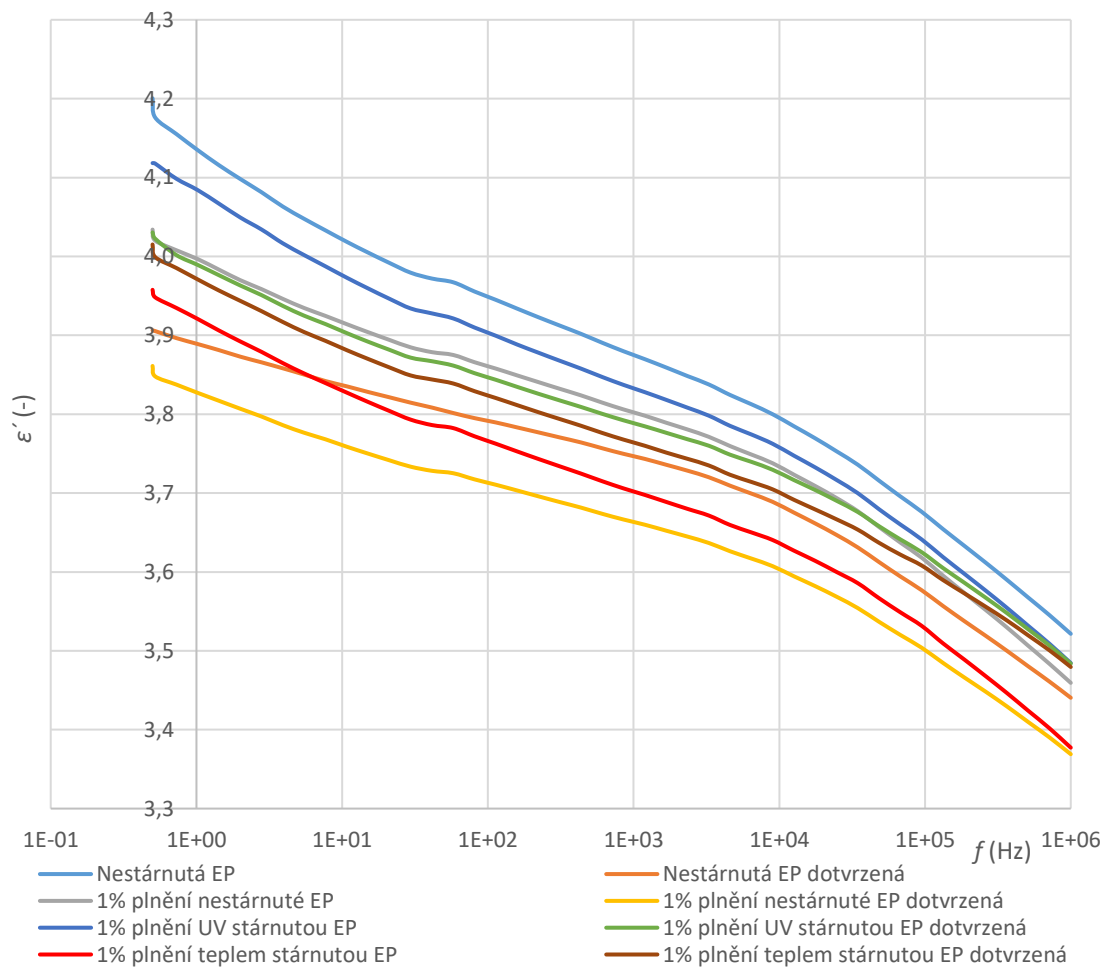
Obr. 3.3.18 Grafické zobrazení závislosti relativních permitivit na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% teplem stárnutým plněním



Obr. 3.3.19 Grafické zobrazení závislosti relativních permitivit na teplotě nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním



Obr. 3.3.20 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na frekvenci nestárnutých a stárnutých vzorků EP



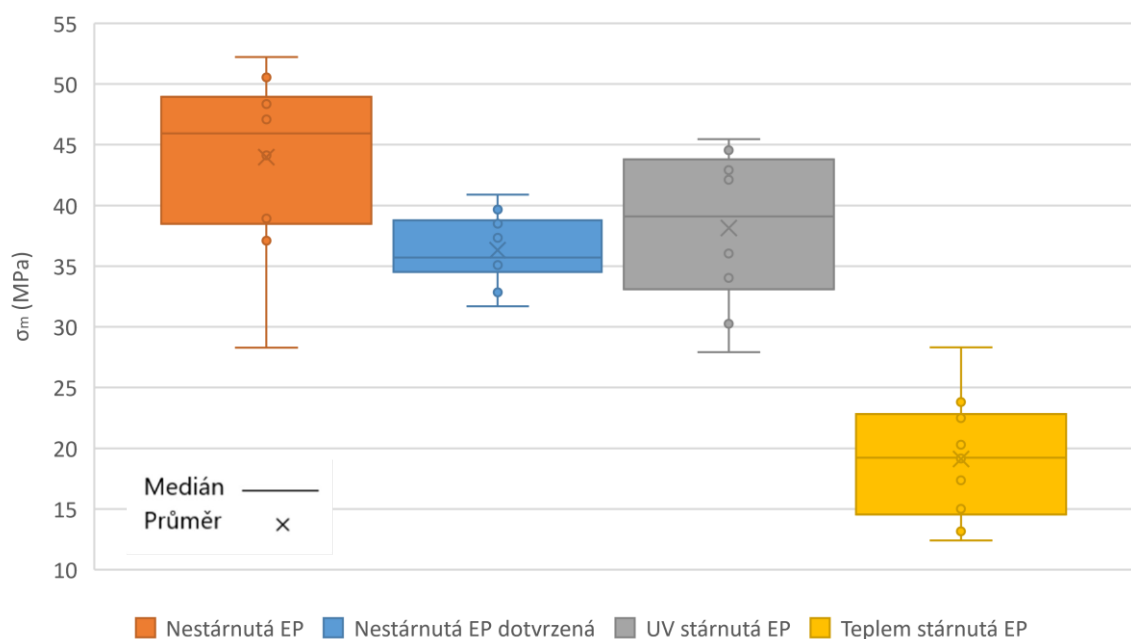
Obr. 3.3.21 Grafické zobrazení závislosti ztrátových činitelů na frekvenci nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním

3.3.4 Vyhodnocení mechanických vlastností

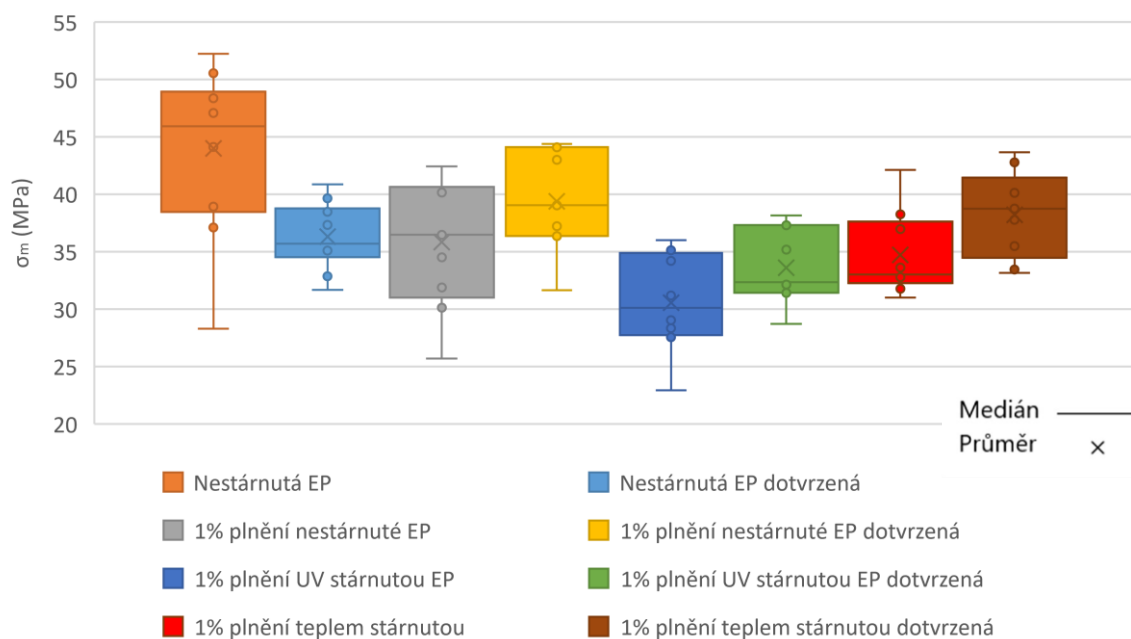
V Tab. 3.3.11 v této podkapitole jsou vypsané statistické analýzy mezí pevnosti σ_m všech měření epoxidových pryskyřic. Ve grafických znázorněních Obr. 3.3.22 a Obr. 3.3.23 jsou zobrazeny příslušné analýzy a porovnání vzorků před a po stárnutí a nově vzniklé materiály z 1% plnění různě stárnutých prášků v nedotvrzené i dotvrzené formě. Celé tabulky související s mezí pevnosti jsou v příloze Tab. 6.34 a Tab. 6.35.

Tab. 3.3.11 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% plněné UV stárnuté EP dotvrzené

	Statistické vyhodnocení meze pevnosti					
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\bar{x}_{0,5}$	s_p	V_x
Nestárnutá EP	28,29205	52,21667	43,98088	45,92715	6,91918	15,73224
Nestárnutá EP dotvrzená	31,68203	40,87443	36,30415	35,69869	2,71757	7,48556
UV stárnutá EP	27,92234	45,46691	38,13056	39,07803	6,02986	15,81373
Teplem stárnutá EP	12,39583	28,30023	19,12415	19,22058	4,68564	24,50117
1% plnění nestárnuté EP	25,68858	42,43615	35,84005	36,47152	5,39614	15,05617
1% plnění nestárnuté EP dotvrzená	31,65179	44,38798	39,38961	39,03378	4,37494	11,10683
1% plnění UV stárnuté EP	22,93586	36,01029	30,54847	30,11589	4,16172	13,62335
1% plnění UV stárnuté EP dotvrzená	28,71903	38,16368	33,60767	32,35280	3,14635	9,36199
1% plnění teplem stárnuté EP	31,00097	42,11184	34,71260	33,01054	3,43159	9,88573
1% plnění teplem stárnuté EP dotvrzená	33,16801	43,64979	38,22147	38,74175	3,50500	9,17024



Obr. 3.3.22 Grafické zobrazení četností mezí pevnosti EP bez plnění



Obr. 3.3.23 Grafické zobrazení četností mezi pevnosti nestárnutých EP bez plnění a s 1% plněním

3.4 Shrnutí výsledků měření

3.4.1 Zhodnocení vnitřních rezistivit a polarizačních indexů

Při pohledu na výsledky vnitřních rezistivit je patrné, že pouhé dotvrzení neplněných vzorků zvýší tento parametr o řád, a to na hodnoty $10^{15} \Omega \cdot \text{m}$. Obdobné zvýšení, byť není tolik výrazné, vnitřní rezistivity bylo patrné i u vzorků stárnutých UV světlem a teplem.

Hodnoty vnitřních rezistivit u 1% plněných vzorků napříč druhům stárnutí plnění byly obdobné, pohybující se od přibližně $2 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ do přibližně $5 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$, což bylo o něco málo vyšší než hodnoty pro čisté nedotvrzené vzorky. Z tohoto pohledu tedy plnění přineslo zvýšení vnitřní rezistivity. Dotvrzení plněných vzorků nemělo velký vliv na tento parametr, což je oproti čistým vzorkům, kde tento parametr stoupl o řád, velký rozdíl.

Polarizační indexy u neplněných vzorků dotvrzených a stárnutých byly zvýšeny o přibližně 0,5 jednotek oproti neupravenému stavu vzorků. Pro polarizační indexy u neplněných vzorků je tedy lepší provést vytvrzení či stárnutí, což se nedá říct u plněných vzorků. U plněných vzorků totiž hodnoty polarizačních indexů klesly napříč druhy plnění. Celkově se však polarizační indexy oproti neplněným nedotvrzeným vzorkům zvýšilo o 0,2 až 0,5 jednotek. Dotvrzení plněných vzorků má tedy nežádoucí vliv, což je v rozporu s hodnotami neplněných vzorků, kde se této parametry zvýšily.

3.4.2 Zhodnocení ztrátových činitelů

U měření ztrátového činitele se měřila závislost tohoto parametru na teplotě a frekvenci. U měření teplotních závislostí patrná u nedotvrzených vzorků jistá změna trendu, kde mezi 60 °C a 70 °C došlo ke stagnaci a jistému prohnutí ztrátového činitele, jak je patrné na grafech. Toto prohnutí je dáno přechodem skelného přechodu u tohoto materiálu, což potvrzují i informace od výrobce pryskyřice. U dotvrzených vzorků toto prohnutí, dle očekávání, není patrné.

Dotvrzení vzorků má krom změny tvaru křivek vlivu ztrátového činitele na teplotě i vliv na celkové snížení hodnot tohoto parametru. Oproti tomu přítomnost plnění ve vzorcích má malý vliv na ztrátový činitel a jeho hodnoty jsou srovnatelné se vzorky bez plnění.

Rozdíly ztrátových činitelů u vyhodnocení frekvenčních závislostí jsou malé a u zvolené měřené teploty 23 ± 2 °C nejsou nikterak odlišné. Za zmínku stojí vliv dotvrzení u tohoto parametru na frekvenční závislost, kde se vlivem vytvrzení ztrátový činitel nijak významně snížil.

3.4.3 Zhodnocení relativních permitivit

U měření relativní permitivity se měřila závislost tohoto parametru na teplotě a frekvenci. U teplotní závislosti je patrné, že významný dynamický zdvih relativní permitivity nastává u teploty 55 °C a u teplot okolo této hodnoty. Relativní permitivita, napříč všemi druhy vzorků, mezi teplotou 30 °C a 80 °C z původních hodnot kolem 3,5 skoro zdvojnásobila tuto jednotku na přibližně 6,5.

Vliv dotvrzení vzorků se prokázal snížením relativní permitivity o přibližně 10% u většiny měřených teplot. Vliv plnění na tento parametr neměl vliv a hodnoty relativních permitivit byly obdobné s hodnotami získanými z neplněných vzorků.

Rozdíly u vyhodnocení frekvenčních závislostí tohoto parametru jsou malé a u zvolené měřené teploty 23 ± 2 °C nejsou nikterak odlišné, jako tomu bylo u hodnocení ztrátového činitele. Za zmínku stojí vliv dotvrzení u tohoto parametru na frekvenční závislost, kde se vlivem vytvrzení reálná část komplexní permitivity nijak významně snížila.

3.4.4 Zhodnocení mechanických vlastností

Nejlepší tahové vlastnosti prokázaly vzorky, které byly neplněné a nebyly nijak stárnuté či dotvrzené. Meze pevností takových materiálů se běžně pohybovaly nad 45 MPa. Neplněné nestárnuté vzorky měly sice nejvyšší meze pevnosti, vykázaly ale také největší rozptyl hodnot (28 až 52 MPa), což je důležité také brát v úvahu. Oproti tomu vzorky stárnuté teplem ukázaly velkou degradaci mechanické pevnosti a meze pevností se pohybovaly okolo 20 MPa.

Plnění také snižuje mez pevnosti. Plnění 1% snižuje mez pevnosti o 30% u plnění UV stárnutého prášku a o 20% u plnění nestárnutým práškem. Zajímavé je, že dotvrzením se meze pevností zvýší, oproti nedotvrzeným vzorkům, o 3 až 4 MPa, tedy o přibližně 10%, což je oproti testům na neplněných pryskyřicích, kde mez pevnosti klesl, jinak.

Plnění a stárnutí má vliv na parametr meze pevnosti a celkově materiál oslabuje. Toto je dáno především tvorbou nehomogenit a jistému nabourání celistvé sítě, která vzniká během vytvrzování. Dá se předpokládat, že větší procentuální množství bude i nadále oslabovat celistvost. Na druhou stranu však u některých aplikací toto mírné snížení meze pevnosti nemusí tak podstatné a může se tedy plnění využít.

4 Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývala možností znovuvyužití epoxidových pryskyřic a experimentální zkoušení přidání 1% hmotnostního množství různě stárnutých mechanicky nadrcených prášků. Práce se zaměřovala na změny v elektrických a mechanických parametrech nově vzniklých plněných vzorků oproti vzorkům, které byly vyrobeny bez plnění. Zároveň se zkoumal vliv dotvrzení vzorků použité „cold-cure“ pryskyřice a její vliv na zkoumané parametry.

Výstupem této práce je tedy zhodnocení, že přidáním 1% hmotnostního plnění do nových vzorků má pouze zanedbatelný vliv na zkoumané elektrické vlastnosti. Konkrétně se jedná o parametry vnitřní rezistivity, polarizačních indexů, relativní permitivity a ztrátové činitele. U všech těchto parametrů bylo vyhodnoceno, že 1% plněné vzorky mají obdobné hodnoty jako vzorky, které byly vyrobeny bez plnění.

U zhodnocení mechanických vlastností se vliv plnění projevil jistým snížením meze pevnosti. Toto snížení však není na tolik enormní, aby se u některých méně náročných aplikací (nebo aplikací, kde bude tato pevnost dostačující), nemohlo takovéto 1% plnění využít.

Dalším postupem práce bych navrhoval zkoumat další vlivy jiného procentuálního hmotnostního množství plnění u epoxidových pryskyřic, například 2%, 5% až 10% a sledoval měnící se parametry pro tato plnění. Bylo by přínosné zjišťovat kolika procentní plnění je ještě přínosné či snesitelné pro nové materiály a jak změny vlastností plněných vzorků.

Dále bych se zaměřil na různé velikosti vloček v práškových směsích a zkoumal vliv jejich velikostí na zkoumané parametry. Drcení na velmi malé částice je časově a finančně daleko namáhavější než výroba prášků o větších vločkách. Možnost vnášet do materiálu větší vločky by mohlo zlevnit a zrychlit výrobu nových plněných epoxidových pryskyřic a mohlo by přilákat výrobce elektroniky více zakomponovat vysloužilý materiál do svých výrobků.

Zkoumání takových možností vnášet do nových materiálů i práškové formy materiálu v jakémkoliv stárnutém stavu by pomohlo recyklovat vysloužilé materiály a pomohlo aspoň s malou částí problému s životním prostředím a se skládkováním.

5 Literatura

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. B.m.: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] LIDAŘÍK, Miloslav. *Epoxidové pryskyřice. Třetí, přepracované a rozšířené vydání*. B.m.: Nakladatelství technické literatury, Praha, 1983. ISBN - není.
- [3] *Epoxide Resin – The Plastics Historical Society* [online]. [vid. 2021-04-22]. Dostupné z: http://plasticquarian.com/?page_id=14265
- [4] MLEZIVA, Josef a Jarolím ŠŇUPÁREK. *Polymery - struktura, vlastnosti a použití*, 2. vyd. B.m.: Sobotáles, Praha, 2006. ISBN 80-85920-72-7.
- [5] LI, Zi Jian, Jiang ZHONG, Mao Chen LIU, Jin Chuang RONG, Kun YANG, Ji Yong ZHOU, Liang SHEN, Fei GAO a Hai Feng HE. Investigation on Self-healing Property of Epoxy Resins Based on Disulfide Dynamic Links. *Chinese Journal of Polymer Science (English Edition)* [online]. 2020, **38**(9), 932–940. ISSN 14396203. Dostupné z: doi:10.1007/s10118-020-2406-x
- [6] ZHAO, Xu, Xiong Lei WANG, Fei TIAN, Wen Li AN, Shimei XU a Yu Zhong WANG. A fast and mild closed-loop recycling of anhydride-cured epoxy through microwave-assisted catalytic degradation by trifunctional amine and subsequent reuse without separation. *Green Chemistry* [online]. 2019, **21**(9), 2487–2493 [vid. 2021-05-01]. ISSN 14639270. Dostupné z: doi:10.1039/c9gc00685k
- [7] POST, Wouter, Arijana SUSA, Rolf BLAAUW, Karin MOLENVELD a Rutger J.I. KNOOP. *A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications* [online]. B.m.: Taylor and Francis Inc. 2. duben 2020 [vid. 2021-05-01]. ISSN 15583716. Dostupné z: doi:10.1080/15583724.2019.1673406
- [8] CIRKULÁRNÍ HUB PRAHA. *Energetické využití odpadu* [online]. 2020 [vid. 2021-05-01]. Dostupné z: https://hub.cirkularnicesko.cz/wp-content/uploads/2020/09/08_2020_info_energetické-využití-odpadů.pdf
- [9] DIAO, Zhijun, Yuemin ZHAO, Bo CHEN, Chenlong DUAN a Sun SONG. ReaxFF reactive force field for molecular dynamics simulations of epoxy resin thermal decomposition with model compound. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2013, **104**, 618–624 [vid. 2021-05-01]. ISSN 01652370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2013.05.005

- [10] OKAJIMA, Idzumi, Kaori WATANABE, Shogo HARAMIISHI, Mizuki NAKAMURA, Yoshinobu SHIMAMURA a Takeshi SAKO. Recycling of carbon fiber reinforced plastic containing amine-cured epoxy resin using supercritical and subcritical fluids. *Journal of Supercritical Fluids* [online]. 2017, **119**, 44–51. ISSN 08968446. Dostupné z: doi:10.1016/j.supflu.2016.08.015
- [11] MOHAN, T.P. a K. KANNY. Reuse of cured epoxy as a reinforcement in an epoxy composite. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2013, **53**(9), 1839–1844 [vid. 2021-04-22]. ISSN 00323888. Dostupné z: doi:10.1002/pen.23444
- [12] ABDOU, T. R., A. B. BOTELHO JUNIOR, D. C.R. ESPINOSA a J. A.S. TENÓRIO. Recycling of polymeric composites from industrial waste by pyrolysis: Deep evaluation for carbon fibers reuse. *Waste Management* [online]. 2021, **120**, 1–9. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/J.WASMAN.2020.11.010
- [13] SANTELLA, Chiara, Lorenzo CAFIERO, Doina DE ANGELIS, Floriana LA MARCA, Riccardo TUFFI a Stefano VECCHIO CIPRIOTI. Thermal and catalytic pyrolysis of a mixture of plastics from small waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Waste Management* [online]. 2016, **54**, 143–152 [vid. 2022-05-07]. ISSN 18792456. Dostupné z: doi:10.1016/J.WASMAN.2016.05.005
- [14] AL-SALEM, S. M., A. ANTELAVA, A. CONSTANTINOU, G. MANOS a A. DUTTA. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, **197**, 177–198. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/J.JENVMAN.2017.03.084
- [15] MA, Yijia a Steven NUTT. Chemical treatment for recycling of amine/epoxy composites at atmospheric pressure. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2018, **153**, 307–317. ISSN 0141-3910. Dostupné z: doi:10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2018.05.011
- [16] GIORGINI, Loris, Tiziana BENELLI, Laura MAZZOCCHETTI, Chiara LEONARDI, Giorgio ZATTINI, Giangiacomo MINAK, Enrico DOLCINI, Massimo CAVAZZONI, Ivan MONTANARI a Cristian TOSI. Recovery of carbon fibers from cured and uncured carbon fiber reinforced composites wastes and their use as feedstock for a new composite production. *Polymer Composites* [online]. 2015, **36**(6), 1084–1095. ISSN 15480569. Dostupné z: doi:10.1002/PC.23440
- [17] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. B.m.: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.

- [18] ŠEBESTA, Petr. *Vliv aditiv na elektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic* [online]. 2016 [vid. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/44403059>
- [19] ŠTAJNER, David. *Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku* [online]. 2014 [vid. 2021-04-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86384
- [20] KÚDELČÍK, Jozef, Štefan HARDONĚ, Pavel TRNKA, Ondřej MICHAL a Jaroslav HORNAK. Dielectric responses of polyurethane/zinc oxide blends for dry-type cast cold-curing resin transformers. *Polymers* [online]. 2021, **13**(3), 1–12. ISSN 20734360. Dostupné z: [doi:10.3390/POLYM13030375](https://doi.org/10.3390/POLYM13030375)
- [21] HORNAK, Jaroslav, Petr KADLEC a Radek POLANSKÝ. Halloysite nanotubes as an additive to ensure enhanced characteristics of cold-curing epoxy resins under fire conditions. *Polymers* [online]. 2020, **12**(9). ISSN 20734360. Dostupné z: [doi:10.3390/POLYM12091881](https://doi.org/10.3390/POLYM12091881)
- [22] HORNAK, Jaroslav. Cold-curing potting compounds and possibilities of their modification by incorporation of nanoparticles. 2022.
- [23] LIONETTO, Francesca, Alessia TIMO a Mariaenrica FRIGIONE. Cold-Cured Epoxy-Based Organic–Inorganic Hybrid Resins Containing Deep Eutectic Solvents. *Polymers 2019, Vol. 11, Page 14* [online]. 2018, **11**(1), 14 [vid. 2022-05-08]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: [doi:10.3390/POLYM11010014](https://doi.org/10.3390/POLYM11010014)
- [24] CORCIONE, Carola Esposito, Fabrizio FREULI a Mariaenrica FRIGIONE. Cold-Curing Structural Epoxy Resins: Analysis of the Curing Reaction as a Function of Curing Time and Thickness. *Materials 2014, Vol. 7, Pages 6832–6842* [online]. 2014, **7**(9), 6832–6842 [vid. 2022-05-08]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: [doi:10.3390/MA7096832](https://doi.org/10.3390/MA7096832)
- [25] SERRA, Angels, Xavier RAMIS a Xavier FERNÁNDEZ-FRANCOS. Epoxy sol-gel hybrid thermosets. *Coatings* [online]. 2016, **6**(1). ISSN 20796412. Dostupné z: [doi:10.3390/COATINGS6010008](https://doi.org/10.3390/COATINGS6010008)
- [26] TRNKA, Pavel. Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů. nedatováno.
- [27] GUILLET, J.E. FUNDAMENTAL PROCESSES IN THE UV DEGRADATION AND STABILIZATION OF POLYMERS. *Chemical Transformations of Polymers* [online]. 1972, 135–144. Dostupné z: [doi:10.1016/B978-0-408-70310-9.50012-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-408-70310-9.50012-5)

- [28] ANDRADY, Anthony L. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* [online]. 2011, **62**(8), 1596–1605. ISSN 0025-326X. Dostupné z: doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2011.05.030
- [29] *Stárnutí polymerů* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/16.html>
- [30] GEWERT, Berit, Merle M. PLASSMANN a Matthew MACLEOD. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts* [online]. 2015, **17**(9), 1513–1521 [vid. 2022-05-06]. ISSN 20507895. Dostupné z: doi:10.1039/C5EM00207A
- [31] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. B.m.: 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [32] HORNAK, J., O. MICHAL, P. TRNKA, P. KADLEC, V. MENTLIK a P. TOTZAUER. Verification of Relative Permittivity Models for Composite Nanodielectrics at Elevated Temperatures. *ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application* [online]. 2019. Dostupné z: doi:10.1109/ICHVE.2018.8642034
- [33] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN, 2008. ISBN 80-7300-189-6.
- [34] HAEFELY TEST AG. *Návod k obsluze: 2830/2831 Analyzátor olejů a pevných dielektrik. Verze 1.2.* nedatováno.
- [35] KREMER, Friedrich a Andreas SCHONHALS. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer-V. B.m.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. ISBN 978-3-642-56120-7.
- [36] SMETANA, Jaroslav a BLUEN PANTHER S.R.O. 51. MSV v Brně. *Časopis Elektro* [online]. 2009 [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: www.blue-panther.cz
- [37] POLANSKÝ, Radek. *Obecná hlediska využití metod materiálové analýzy v elektrotechnice.* (Přednáška). 2021.
- [38] *Zkoušky plastů dle ISO 527-2 | JD Dvořák - Zkušební technika* [online]. [vid. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/iso-527-2-stanoveni-tahovych-vlastnosti-tvarenych-plastu>
- [39] *EC141 – W241 | ELCHEMCo* [online]. [vid. 2022-03-17]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/29/ec141--w241/>

-
- [40] 6775 FREEZER/MILL ® OPERATING MANUAL [online]. 2015 [vid. 2022-04-17]. Dostupné z: www.spexsampleprep.com
- [41] *6775 Freezer/Mill - Small cryogenic mill. Grinds tough samples, plastics, animal and plant tissue for DNA/RNA extraction, forensic testing | SPEX SamplePrep* [online]. [vid. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.spexsampleprep.com/6775freezermill-for-cryogenic-grinding>
- [42] FRIESL, Michal. Pravděpodobnost a statistika hypertextově verze 2014-02-08 PRINT [online]. 2002 [vid. 2022-03-17]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~friesl/>
- [43] *Box-Plot neboli Krabicový graf – Kvalita jednoduše* [online]. [vid. 2022-03-17]. Dostupné z: <http://kvalita-jednoduse.cz/box-plot/>
- [44] *Boxplot – krabicový graf – Kurzy, konzultace, návody* [online]. [vid. 2022-03-17]. Dostupné z: <https://exceltown.com/navody/grafy-v-excelu/boxplot-krabicovy-graf/>

6 Přílohy

Tab. 6.1 Změřené a določítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů nestárnuté EP

Nestárnutá EP								
t (s)	1	2	3	4	5	6	7	8
15	2,46E-11	2,62E-11	2,38E-11	3,97E-11	2,86E-11	2,40E-11	2,44E-11	2,85E-11
60	1,24E-11	1,34E-11	1,23E-11	2,14E-11	1,60E-11	1,25E-11	1,08E-11	1,47E-11
600	5,84E-12	7,14E-12	6,59E-12	1,18E-11	8,86E-12	5,74E-12	4,85E-12	7,74E-12
3600	4,48E-12	5,90E-12	5,25E-12	9,63E-12	7,31E-12	4,72E-12	4,17E-12	6,06E-12
h_s (mm)	1,616	1,581	1,676	1,070	2,041	2,448	2,283	2,507
ρ_{i1} (-)	1,987	1,953	1,936	1,859	1,796	1,927	2,246	1,938
ρ_{i10} (-)	2,125	1,879	1,864	1,812	1,801	2,171	2,238	1,899
R_v (Ω)	2,23E+14	1,69E+14	1,90E+14	1,04E+14	1,37E+14	2,12E+14	2,40E+14	1,65E+14
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	3,16E+14	2,45E+14	2,60E+14	2,22E+14	1,53E+14	1,98E+14	2,40E+14	1,51E+14

Nestárnutá EP								\bar{x}	Proud i_d [A]
9	10	11	12	13	14	15			
2,91E-11	2,26E-11	2,63E-11	3,86E-11	1,93E-11	1,76E-11	1,85E-11	2,86E-11	Vypočítané hodnoty	
1,58E-11	1,16E-11	1,13E-11	1,78E-11	8,41E-12	8,82E-12	9,09E-12	1,49E-11		
8,09E-12	6,00E-12	3,65E-12	7,30E-12	3,04E-12	4,15E-12	5,37E-12	7,84E-12		
6,52E-12	4,82E-12	2,61E-12	5,49E-12	3,13E-12	3,34E-12	4,47E-12	6,31E-12		
1,803	1,778	2,817	2,229	2,404	2,226	2,854	1,486	Vypočítané hodnoty	
1,848	1,954	2,331	2,166	2,301	1,998	2,040	1,923		
1,947	1,931	3,096	2,439	2,764	2,124	1,693	1,897		
1,53E+14	2,08E+14	3,83E+14	1,82E+14	3,19E+14	2,99E+14	2,24E+14	7,92E+13		
1,95E+14	2,67E+14	3,11E+14	1,87E+14	3,04E+14	3,07E+14	1,79E+14	1,22E+14		

Tab. 6.2 Změřené a določítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů nestárnuté EP dotvrzené

Nestárnutá EP dotvrzená						Vypočítané hodnoty	
t (s)	1	2	3	4	\bar{x}		
15	1,74E-11	1,70E-11	2,34E-11	1,43E-11	3,00E+00		Proud i_d [A]
60	7,28E-12	6,61E-12	8,78E-12	6,10E-12	1,20E+01		
600	1,96E-12	1,85E-12	2,25E-12	2,10E-12	1,20E+02		
3600	9,63E-13	1,01E-12	1,37E-12	1,24E-12	7,20E+02		
h_s (mm)	1,581	1,676	1,070	2,041	1,592		Vypočítané hodnoty
ρ_{i1} (-)	2,390	2,570	2,668	2,346	2,494		
ρ_{i10} (-)	3,704	3,575	3,909	2,906	3,523		
R_v (Ω)	1,04E+15	9,95E+14	7,30E+14	8,07E+14	8,93E+14		
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	1,50E+15	1,36E+15	1,56E+15	9,05E+14	1,33E+15		

Tab. 6.3 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů UV stárnuté EP

UV stárnutá EP							
t (s)	1	2	3	4	5	\bar{x}	
15	1,32E-11	1,46E-11	1,27E-11	1,91E-11	1,63E-11	1,52E-11	Proud i_d [A]
60	4,95E-12	6,03E-12	5,12E-12	7,73E-12	6,67E-12	6,10E-12	
600	1,52E-12	1,99E-12	1,67E-12	2,46E-12	2,18E-12	1,96E-12	
3600	9,67E-13	1,12E-12	9,77E-13	1,46E-12	1,28E-12	1,16E-12	
h_s (mm)	2,448	2,283	2,507	1,803	1,778	2,164	Vypočítané hodnoty
ρ_{i1} (-)	2,658	2,424	2,483	2,470	2,445	2,496	
ρ_{i10} (-)	3,254	3,024	3,074	3,140	3,065	3,112	
R_v (Ω)	1,03E+15	8,91E+14	1,02E+15	6,86E+14	7,82E+14	8,83E+14	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	9,66E+14	8,93E+14	9,34E+14	8,70E+14	1,01E+15	9,34E+14	

Tab. 6.4 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů teplem stárnuté EP

Teplem stárnutá EP							
t (s)	1	2	3	4	5	\bar{x}	
15	1,27E-11	1,39E-11	1,38E-11	1,38E-11	1,30E-11	1,34E-11	Proud i_d [A]
60	5,22E-12	5,90E-12	5,79E-12	6,15E-12	5,65E-12	5,74E-12	
600	1,53E-12	1,84E-12	1,78E-12	2,08E-12	1,83E-12	1,81E-12	
3600	7,97E-13	1,05E-12	1,02E-12	1,24E-12	9,89E-13	1,02E-12	
h_s (mm)	2,817	2,229	2,404	2,226	2,854	2,506	Vypočítané hodnoty
ρ_{i1} (-)	2,438	2,364	2,381	2,245	2,294	2,344	
ρ_{i10} (-)	3,415	3,203	3,255	2,952	3,086	3,182	
R_v (Ω)	1,25E+15	9,53E+14	9,78E+14	8,07E+14	1,01E+15	1,00E+15	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	1,02E+15	9,78E+14	9,31E+14	8,29E+14	8,11E+14	9,14E+14	

Tab. 6.5 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% EP

1% plnění nestárnuté EP							
t (s)	1	2	3	4	5	\bar{x}	
15	2,38E-11	3,04E-11	2,32E-11	2,57E-11	3,42E-11	2,74E-11	Proud i_d [A]
60	9,57E-12	1,38E-11	9,27E-12	1,05E-11	1,59E-11	1,18E-11	
600	3,38E-12	3,51E-12	2,71E-12	3,00E-12	5,67E-12	3,65E-12	
3600	1,81E-12	2,06E-12	1,59E-12	1,82E-12	3,31E-12	2,12E-12	
h_s (mm)	2,735	1,538	2,002	2,299	1,897	2,094	Vypočítané hodnoty
ρ_{i1} (-)	2,482	2,197	2,507	2,451	2,152	2,358	
ρ_{i10} (-)	2,828	3,944	3,418	3,494	2,804	3,298	
R_v (Ω)	5,54E+14	4,86E+14	6,29E+14	5,51E+14	3,02E+14	5,04E+14	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	4,63E+14	7,23E+14	7,19E+14	5,48E+14	3,64E+14	5,63E+14	

Tab. 6.6 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% EP dotvrzené

1% plnění nestárnuté EP dotvrzená						
t (s)	1	2	3	4	\bar{x}	
15	2,10E-11	2,50E-11	2,22E-11	3,12E-11	2,48E-11	Proud i_d [A]
60	9,08E-12	1,10E-11	9,48E-12	1,69E-11	1,16E-11	
600	3,83E-12	3,93E-12	3,07E-12	5,35E-12	4,05E-12	
3600	2,41E-12	2,19E-12	1,83E-12	3,42E-12	2,47E-12	
h_s (mm)	2,735	2,002	2,299	1,897	2,233	Vypočítané hodnoty
ρ_{i1} (-)	2,310	2,272	2,337	1,841	2,190	
ρ_{i10} (-)	2,369	2,795	3,085	3,165	2,854	
R_v (Ω)	4,14E+14	4,56E+14	5,45E+14	2,92E+14	4,27E+14	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	3,46E+14	5,21E+14	5,43E+14	3,52E+14	4,41E+14	

Tab. 6.7 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% UV stárnuté EP

1% plnění UV stárnutou EP							
t (s)	1	2	3	4	5	\bar{x}	
15	3,31E-11	5,13E-11	4,19E-11	4,18E-11	3,34E-11	4,03E-11	Proud i_d [A]
60	1,36E-11	2,29E-11	1,89E-11	1,87E-11	1,39E-11	1,76E-11	
600	4,81E-12	9,02E-12	7,09E-12	6,90E-12	4,55E-12	6,47E-12	
3600	3,33E-12	6,68E-12	4,75E-12	4,13E-12	2,91E-12	4,36E-12	
h_s (mm)	2,182	1,6392	1,8546	1,637	1,702	1,803	Vypočítané hodnoty
ρ_{i1} (-)	2,433	2,237	2,212	2,241	2,396	2,304	
ρ_{i10} (-)	2,829	2,543	2,672	2,703	3,066	2,763	
R_v (Ω)	3,01E+14	1,50E+14	2,10E+14	2,42E+14	3,44E+14	2,49E+14	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	3,15E+14	2,09E+14	2,60E+14	3,39E+14	4,62E+14	3,17E+14	

Tab. 6.8 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% UV stárnuté EP dotvrzené

1% plnění UV stárnutou EP dotvrzená						
t (s)	1	2	3	4	\bar{x}	
15	3,48E-11	3,23E-11	2,90E-11	3,59E-11	3,30E-11	Proud i_d [A]
60	1,67E-11	1,51E-11	1,33E-11	1,69E-11	1,55E-11	
600	7,08E-12	6,13E-12	5,37E-12	7,29E-12	6,47E-12	
3600	4,73E-12	4,02E-12	3,46E-12	4,68E-12	4,22E-12	
h_s (mm)	1,6392	1,8546	1,637	1,702	1,708	Vypočítané hodnoty
ρ_{i1} (-)	2,084	2,139	2,184	2,120	2,132	
ρ_{i10} (-)	2,360	2,463	2,471	2,325	2,405	
R_v (Ω)	2,11E+14	2,49E+14	2,89E+14	2,14E+14	2,41E+14	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	2,95E+14	3,07E+14	4,04E+14	2,87E+14	3,23E+14	

Tab. 6.9 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% teplem stárnuté EP

1% plnění teplem stárnutou EP						
t (s)	1	2	3	4	\bar{x}	
15	2,86E-11	2,87E-11	3,35E-11	3,81E-11	3,22E-11	Proud i_d [A]
60	1,20E-11	1,21E-11	1,44E-11	1,68E-11	1,38E-11	
600	4,02E-12	4,04E-12	5,12E-12	6,32E-12	4,88E-12	
3600	2,73E-12	2,77E-12	3,61E-12	4,65E-12	3,44E-12	
h_s (mm)	1,961	2,016	2,078	1,727	1,946	Vypočítané hodnoty
p_{i1} (-)	2,393	2,372	2,331	2,270	2,342	
p_{i10} (-)	2,972	2,991	2,807	2,657	2,857	
R_v (Ω)	3,66E+14	3,61E+14	2,77E+14	2,15E+14	3,05E+14	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	4,27E+14	4,09E+14	3,05E+14	2,85E+14	3,56E+14	

Tab. 6.10 Změřené a dopočítané hodnoty pro stanovení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů 1% teplem stárnuté EP dotvrzené

1% plnění teplem stárnutou EP dotvrzená					
t (s)	1	2	3	\bar{x}	
15	4,06E-11	4,23E-11	5,01E-11	4,43E-11	Proud i_d [A]
60	2,05E-11	2,20E-11	2,48E-11	2,24E-11	
600	9,59E-12	1,01E-11	1,01E-11	9,93E-12	
3600	7,11E-12	6,82E-12	7,75E-12	7,23E-12	
h_s (mm)	1,961	2,016	2,078	2,018	Vypočítané hodnoty
p_{i1} (-)	1,976	1,927	2,023	1,975	
p_{i10} (-)	2,142	2,171	2,455	2,256	
R_v (Ω)	1,41E+14	1,47E+14	1,29E+14	1,39E+14	
ρ_v ($\Omega \cdot m$)	1,64E+14	1,67E+14	1,42E+14	1,58E+14	

Tab. 6.11 Změřené hodnoty ztrátového činitele nestárnuté EP

Nestárnutá EP								
T (°)	1	2	3	4	5	6	7	8
30	0,00822	0,00819	0,00807	0,00825	0,00866	0,00901	0,00915	0,0091
40	0,00993	0,00976	0,00909	0,00931	0,00981	0,0101	0,0104	0,0104
50	0,0155	0,0156	0,014	0,0146	0,0167	0,0168	0,0176	0,0178
60	0,0788	0,08	0,063	0,0875	0,0784	0,0832	0,0838	0,0877
70	0,114	0,114	0,0809	0,122	0,104	0,104	0,104	0,106
80	0,38	0,382	0,317	0,398	0,35	0,339	0,336	0,328

Nestárnutá EP							
9	10	11	12	13	14	15	\bar{x}
0,00878	0,00849	0,0123	0,0131	0,00888	0,00911	0,00856	0,009191
0,00993	0,00956	0,0168	0,0178	0,00981	0,01	0,00938	0,010805
0,0174	0,0157	0,0544	0,0642	0,0154	0,0156	0,013	0,02162
0,0807	0,0754	0,0887	0,0883	0,0872	0,0822	0,0713	0,08108
0,108	0,0945	0,104	0,118	0,102	0,101	0,0852	0,104107
0,371	0,323	0,341	0,414	0,308	0,316	0,238	0,342733

Tab. 6.12 Změřené hodnoty ztrátového činitele nestárnuté EP dotvrzené

Nestárnutá EP dotvrzená					
T (°)	1	2	3	4	\bar{x}
30	0,00754	0,00729	0,00805	0,00782	0,007675
40	0,00905	0,00843	0,00931	0,00896	0,008938
50	0,015	0,0135	0,0154	0,015	0,014725
60	0,0581	0,0476	0,059	0,0624	0,056775
70	0,0765	0,0704	0,0832	0,0734	0,075875
80	0,107	0,0893	0,106	0,108	0,102575

Tab. 6.13 Změřené hodnoty ztrátového činitele UV stárnuté EP

UV stárnutá EP						
T (°)	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	0,00806	0,00866	0,00883	0,0084	0,00793	0,008376
40	0,0101	0,0104	0,0105	0,00975	0,00919	0,009988
50	0,0183	0,0191	0,0197	0,0183	0,0134	0,01776
60	0,0669	0,0678	0,0717	0,0571	0,0564	0,06398
70	0,0904	0,0896	0,0951	0,0882	0,0805	0,08876
80	0,16	0,139	0,143	0,139	0,12	0,1402

Tab. 6.14 Změřené hodnoty ztrátového činitele teplem stárnuté EP

Teplem stárnutá EP						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	0,00627	0,00558	0,0053	0,005	0,0054	0,00551
40	0,00729	0,00603	0,00592	0,00527	0,00602	0,006106
50	0,0103	0,008	0,00797	0,00656	0,00786	0,008138
60	0,046	0,0306	0,0279	0,0199	0,0241	0,0297
70	0,136	0,121	0,122	0,0924	0,0748	0,10924
80	0,277	0,287	0,284	0,246	0,221	0,263

Tab. 6.15 Změřené hodnoty ztrátového činitele 1% EP

1% plnění nestárnuté EP						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	0,0117	0,00905	0,0102	0,0106	0,00866	0,010042
40	0,0181	0,0125	0,0113	0,0141	0,0112	0,01344
50	0,0565	0,0456	0,0399	0,0493	0,0383	0,04592
60	0,0826	0,0822	0,0786	0,0851	0,0702	0,07974
70	0,0899	0,108	0,0968	0,0981	0,0871	0,09598
80	0,286	0,385	0,354	0,339	0,334	0,3396

Tab. 6.16 Změřené hodnoty ztrátového činitele 1% EP dotvrzené

1% plnění nestárnuté EP dotvrzená						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	0,00945	0,0244	0,0114	0,0117	0,00908	0,013206
40	0,0133	0,0348	0,015	0,0153	0,0103	0,01774
50	0,0305	0,0571	0,0275	0,0312	0,0228	0,03382
60	0,0782	0,116	0,0724	0,0826	0,0642	0,08268
70	0,0896	0,15	0,0921	0,0935	0,0768	0,1004
80	0,164	0,231	0,163	0,156	0,137	0,1702

Tab. 6.17 Změřené hodnoty ztrátového činitele 1% UV stárnuté EP

1% plnění UV stárnutou EP						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	0,0105	0,0125	0,011	0,0102	0,0113	0,0111
40	0,0184	0,0236	0,0245	0,0183	0,0213	0,02122
50	0,0608	0,0705	0,0829	0,0624	0,076	0,07052
60	0,0621	0,0625	0,0712	0,0571	0,0728	0,06514
70	0,0944	0,11	0,123	0,0954	0,119	0,10836
80	0,355	0,425	0,426	0,361	0,431	0,3996

Tab. 6.18 Změřené hodnoty ztrátového činitele 1% UV stárnuté EP dotvrzené

1% plnění UV stárnutou EP dotvrzená					
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	\bar{x}
30	0,00912	0,0105	0,0088	0,00975	0,009543
40	0,0123	0,0154	0,0121	0,0143	0,013525
50	0,0438	0,0523	0,0409	0,0389	0,043975
60	0,0728	0,0869	0,0681	0,0834	0,0778
70	0,0875	0,0998	0,0752	0,102	0,091125
80	0,266	0,273	0,203	0,291	0,25825

Tab. 6.19 Změřené hodnoty ztrátového činitele 1% teplem stárnuté EP

1% plnění teplem stárnutou EP					
$T [^{\circ}]$	1	2	3	4	\bar{x}
30	0,0104	0,0109	0,0115	0,0115	0,011075
40	0,0184	0,0172	0,0185	0,0184	0,018125
50	0,0711	0,0594	0,0649	0,0665	0,065475
60	0,0698	0,0644	0,0711	0,0696	0,068725
70	0,124	0,0989	0,102	0,116	0,110225
80	0,427	0,352	0,381	0,41	0,3925

Tab. 6.20 Změřené hodnoty ztrátového činitele 1% teplem stárnuté EP dotvrzené

1% plnění teplem stárnutou EP dotvrzená				
$T [^{\circ}]$	1	2	3	\bar{x}
30	0,00812	0,00819	0,00919	0,0085
40	0,0107	0,0102	0,0118	0,0109
50	0,0196	0,0219	0,0245	0,022
60	0,0707	0,0671	0,0717	0,069833
70	0,0789	0,0747	0,0853	0,079633
80	0,188	0,155	0,166	0,169667

Tab. 6.21 Změřené hodnoty závislosti reálných složek relativní permitivity na frekvenci při teplotě $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

f (Hz)	$\epsilon' (-)$									
	Nestár.	Nestár. dotvrz.	UV stár.	Tepl. stár.	1% nestár.	1% nestár. dotvrz	1% UV stár.	1% UV stár. dotvrz.	1% tepl. stár.	1% tepl. stár. dotvrz
1,00E+06	3,440	3,463	3,496	3,459	3,369	3,484	3,484	3,377	3,479	3,440
7,14E+05	3,461	3,485	3,514	3,483	3,390	3,509	3,507	3,402	3,501	3,461
5,10E+05	3,568	3,480	3,505	3,532	3,506	3,410	3,532	3,527	3,424	3,520
3,64E+05	3,590	3,500	3,526	3,550	3,530	3,430	3,555	3,548	3,447	3,539
2,60E+05	3,612	3,519	3,545	3,568	3,552	3,448	3,576	3,567	3,468	3,556
1,86E+05	3,633	3,538	3,565	3,586	3,573	3,466	3,598	3,586	3,489	3,573
1,33E+05	3,654	3,557	3,584	3,605	3,595	3,485	3,619	3,605	3,509	3,590
9,49E+04	3,676	3,577	3,605	3,625	3,618	3,504	3,641	3,625	3,532	3,608
6,78E+04	3,696	3,594	3,623	3,642	3,637	3,520	3,660	3,641	3,549	3,622
4,84E+04	3,716	3,612	3,641	3,660	3,657	3,537	3,679	3,658	3,567	3,637
3,46E+04	3,736	3,631	3,661	3,680	3,677	3,554	3,700	3,676	3,586	3,654
2,47E+04	3,753	3,647	3,677	3,696	3,694	3,569	3,717	3,690	3,600	3,667
1,76E+04	3,769	3,661	3,691	3,711	3,709	3,582	3,733	3,704	3,614	3,679
1,26E+04	3,785	3,675	3,705	3,725	3,723	3,594	3,747	3,716	3,627	3,691
9,00E+03	3,800	3,689	3,719	3,740	3,738	3,607	3,762	3,730	3,640	3,705
6,43E+03	3,813	3,699	3,730	3,751	3,749	3,617	3,774	3,740	3,650	3,714
4,59E+03	3,824	3,709	3,740	3,760	3,760	3,626	3,785	3,749	3,660	3,723
3,28E+03	3,838	3,720	3,750	3,771	3,771	3,637	3,798	3,760	3,672	3,735
2,34E+03	3,848	3,728	3,758	3,779	3,781	3,645	3,808	3,768	3,680	3,743
1,67E+03	3,859	3,736	3,766	3,786	3,789	3,652	3,818	3,776	3,689	3,751
1,20E+03	3,870	3,743	3,773	3,793	3,798	3,660	3,828	3,785	3,698	3,760
8,54E+02	3,880	3,750	3,780	3,799	3,806	3,666	3,837	3,792	3,706	3,768
6,10E+02	3,891	3,757	3,787	3,805	3,815	3,674	3,847	3,800	3,715	3,776
4,36E+02	3,902	3,764	3,795	3,811	3,824	3,682	3,858	3,809	3,725	3,785
3,11E+02	3,912	3,771	3,801	3,817	3,832	3,689	3,868	3,817	3,734	3,794
2,22E+02	3,923	3,777	3,808	3,822	3,841	3,696	3,878	3,826	3,743	3,802
1,59E+02	3,934	3,783	3,814	3,827	3,849	3,703	3,888	3,835	3,753	3,811
1,13E+02	3,945	3,790	3,821	3,833	3,858	3,711	3,899	3,844	3,763	3,820
8,10E+01	3,956	3,795	3,827	3,837	3,866	3,717	3,910	3,852	3,772	3,829
5,78E+01	3,967	3,801	3,834	3,842	3,875	3,725	3,921	3,862	3,782	3,839
4,13E+01	3,972	3,808	3,841	3,846	3,879	3,728	3,928	3,867	3,786	3,844
2,95E+01	3,979	3,815	3,848	3,851	3,885	3,733	3,934	3,872	3,793	3,849
2,11E+01	3,992	3,821	3,856	3,856	3,894	3,742	3,946	3,882	3,804	3,859
1,51E+01	4,005	3,828	3,863	3,861	3,904	3,750	3,959	3,892	3,816	3,870
1,08E+01	4,019	3,835	3,871	3,867	3,914	3,759	3,973	3,903	3,827	3,881
7,68E+00	4,033	3,842	3,879	3,872	3,925	3,768	3,987	3,914	3,839	3,893
5,49E+00	4,048	3,850	3,887	3,877	3,935	3,776	4,002	3,925	3,852	3,904
3,92E+00	4,063	3,858	3,897	3,885	3,946	3,786	4,017	3,937	3,865	3,917
2,80E+00	4,081	3,866	3,904	3,889	3,958	3,797	4,034	3,951	3,879	3,931
2,00E+00	4,098	3,873	3,912	3,897	3,970	3,807	4,049	3,963	3,892	3,944
1,43E+00	4,116	3,881	3,926	3,902	3,983	3,817	4,067	3,976	3,906	3,957
1,02E+00	4,135	3,889	3,933	3,905	3,997	3,827	4,084	3,989	3,921	3,971
7,29E-01	4,155	3,896	3,941	3,909	4,008	3,837	4,098	4,002	3,935	3,985
5,21E-01	4,176	3,905	3,952	3,920	4,020	3,848	4,118	4,023	3,948	3,999
5,00E-01	4,201	3,906	3,952	3,918	4,034	3,861	4,118	4,030	3,958	4,015

Tab. 6.22 Změřené hodnoty závislosti imag. složek relativní permitivity na frekvenci při teplotě $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

f (Hz)	$\epsilon'' (-)$									
	Nestár.	Nestár. dotvrz.	UV stár.	Tepl. stár.	1% nestár.	1% nestár. dotvrz	1% UV stár.	1% UV stár. dotvrz.	1% tepl. stár.	1% tepl. stár. dotvrz
1,00E+06	0,102	0,088	0,091	0,083	0,104	0,091	0,104	0,096	0,102	0,030
7,14E+05	0,101	0,087	0,090	0,084	0,103	0,089	0,102	0,094	0,100	0,029
5,10E+05	0,101	0,088	0,091	0,086	0,103	0,088	0,102	0,093	0,100	0,029
3,64E+05	0,101	0,088	0,092	0,089	0,103	0,088	0,102	0,092	0,099	0,029
2,60E+05	0,101	0,088	0,092	0,090	0,102	0,087	0,101	0,091	0,098	0,028
1,86E+05	0,098	0,087	0,090	0,089	0,099	0,084	0,098	0,087	0,095	0,027
1,33E+05	0,097	0,086	0,089	0,089	0,097	0,082	0,096	0,085	0,092	0,026
9,49E+04	0,095	0,084	0,087	0,089	0,094	0,080	0,093	0,083	0,089	0,025
6,78E+04	0,092	0,082	0,085	0,088	0,091	0,078	0,091	0,080	0,085	0,024
4,84E+04	0,088	0,079	0,081	0,084	0,086	0,074	0,086	0,076	0,080	0,022
3,46E+04	0,084	0,076	0,077	0,081	0,082	0,071	0,082	0,072	0,076	0,021
2,47E+04	0,080	0,071	0,073	0,077	0,077	0,067	0,078	0,068	0,071	0,020
1,76E+04	0,076	0,067	0,068	0,072	0,072	0,062	0,073	0,064	0,066	0,018
1,26E+04	0,072	0,062	0,063	0,067	0,067	0,058	0,069	0,060	0,061	0,017
9,00E+03	0,068	0,058	0,058	0,062	0,062	0,054	0,065	0,056	0,058	0,016
6,43E+03	0,064	0,053	0,054	0,057	0,058	0,050	0,061	0,052	0,054	0,015
4,59E+03	0,061	0,049	0,050	0,052	0,054	0,047	0,057	0,049	0,051	0,014
3,28E+03	0,058	0,045	0,046	0,047	0,051	0,044	0,055	0,047	0,049	0,013
2,34E+03	0,056	0,042	0,043	0,044	0,048	0,042	0,053	0,045	0,047	0,013
1,67E+03	0,055	0,040	0,040	0,040	0,046	0,040	0,051	0,043	0,046	0,012
1,20E+03	0,054	0,037	0,038	0,038	0,045	0,038	0,050	0,043	0,046	0,012
8,54E+02	0,053	0,036	0,037	0,035	0,043	0,037	0,050	0,042	0,045	0,012
6,10E+02	0,053	0,034	0,035	0,033	0,042	0,037	0,049	0,041	0,045	0,012
4,36E+02	0,052	0,033	0,034	0,031	0,042	0,036	0,049	0,041	0,045	0,012
3,11E+02	0,053	0,032	0,034	0,030	0,042	0,036	0,050	0,041	0,045	0,012
2,22E+02	0,053	0,032	0,033	0,028	0,042	0,036	0,051	0,042	0,046	0,012
1,59E+02	0,054	0,031	0,033	0,027	0,042	0,036	0,052	0,043	0,047	0,012
1,13E+02	0,055	0,031	0,033	0,027	0,043	0,036	0,053	0,044	0,048	0,013
8,10E+01	0,057	0,031	0,033	0,026	0,043	0,037	0,055	0,045	0,049	0,013
5,78E+01	0,058	0,031	0,034	0,026	0,044	0,038	0,057	0,046	0,050	0,013
4,13E+01	0,057	0,032	0,034	0,026	0,043	0,038	0,057	0,045	0,052	0,014
2,95E+01	0,060	0,032	0,035	0,026	0,045	0,039	0,059	0,047	0,052	0,014
2,11E+01	0,063	0,033	0,036	0,027	0,046	0,040	0,061	0,049	0,053	0,014
1,51E+01	0,066	0,033	0,037	0,027	0,048	0,041	0,063	0,051	0,055	0,014
1,08E+01	0,069	0,034	0,039	0,028	0,049	0,043	0,066	0,053	0,057	0,015
7,68E+00	0,073	0,035	0,040	0,028	0,051	0,044	0,069	0,055	0,059	0,015
5,49E+00	0,077	0,036	0,042	0,029	0,053	0,046	0,071	0,056	0,061	0,016
3,92E+00	0,081	0,037	0,043	0,029	0,055	0,047	0,074	0,059	0,063	0,016
2,80E+00	0,086	0,037	0,043	0,031	0,057	0,049	0,077	0,060	0,064	0,017
2,00E+00	0,092	0,038	0,045	0,032	0,059	0,051	0,081	0,063	0,067	0,017
1,43E+00	0,100	0,040	0,048	0,034	0,061	0,053	0,083	0,066	0,070	0,018
1,02E+00	0,109	0,042	0,053	0,037	0,068	0,055	0,088	0,070	0,072	0,018
7,29E-01	0,120	0,044	0,059	0,040	0,070	0,060	0,087	0,074	0,077	0,020
5,21E-01	0,134	0,046	0,066	0,043	0,076	0,065	0,094	0,082	0,081	0,020
5,00E-01	0,151	0,047	0,073	0,045	0,083	0,072	0,124	0,087	0,089	0,022

Tab. 6.23 Změřené hodnoty závislosti ztrátových činitelů na frekvenci při teplotě 23 ± 2 °C

f (Hz)	tg δ (-)									
	Nestár.	Nestár. Dotvrz.	UV stár.	Tepl. stár.	1% nestár.	1% nestár. dotvrz.	1% UV stár.	1% UV stár. dotvrz.	1% tepl. stár.	1% tepl. stár. dotvrz.
1,00E+06	0,029	0,026	0,026	0,024	0,030	0,027	0,030	0,028	0,030	0,026
7,14E+05	0,028	0,025	0,026	0,024	0,030	0,026	0,029	0,027	0,029	0,025
5,10E+05	0,028	0,025	0,026	0,024	0,029	0,026	0,029	0,026	0,029	0,024
3,64E+05	0,028	0,025	0,026	0,025	0,029	0,026	0,029	0,026	0,029	0,024
2,60E+05	0,028	0,025	0,026	0,025	0,029	0,025	0,028	0,025	0,028	0,023
1,86E+05	0,027	0,024	0,025	0,025	0,028	0,024	0,027	0,024	0,027	0,022
1,33E+05	0,026	0,024	0,025	0,025	0,027	0,024	0,026	0,024	0,026	0,022
9,49E+04	0,026	0,024	0,024	0,024	0,026	0,023	0,026	0,023	0,025	0,021
6,78E+04	0,025	0,023	0,023	0,024	0,025	0,022	0,025	0,022	0,024	0,020
4,84E+04	0,024	0,022	0,022	0,023	0,024	0,021	0,023	0,021	0,022	0,019
3,46E+04	0,023	0,021	0,021	0,022	0,022	0,020	0,022	0,020	0,021	0,018
2,47E+04	0,021	0,020	0,020	0,021	0,021	0,019	0,021	0,018	0,020	0,017
1,76E+04	0,020	0,018	0,018	0,019	0,019	0,017	0,020	0,017	0,018	0,016
1,26E+04	0,019	0,017	0,017	0,018	0,018	0,016	0,018	0,016	0,017	0,015
9,00E+03	0,018	0,016	0,016	0,017	0,017	0,015	0,017	0,015	0,016	0,015
6,43E+03	0,017	0,014	0,014	0,015	0,015	0,014	0,016	0,014	0,015	0,014
4,59E+03	0,016	0,013	0,013	0,014	0,014	0,013	0,015	0,013	0,014	0,013
3,28E+03	0,015	0,012	0,012	0,013	0,013	0,012	0,014	0,012	0,013	0,012
2,34E+03	0,015	0,011	0,011	0,012	0,013	0,011	0,014	0,012	0,013	0,012
1,67E+03	0,014	0,011	0,011	0,011	0,012	0,011	0,013	0,011	0,012	0,012
1,20E+03	0,014	0,010	0,010	0,010	0,012	0,010	0,013	0,011	0,012	0,012
8,54E+02	0,014	0,010	0,010	0,009	0,011	0,010	0,013	0,011	0,012	0,011
6,10E+02	0,014	0,009	0,009	0,009	0,011	0,010	0,013	0,011	0,012	0,011
4,36E+02	0,013	0,009	0,009	0,008	0,011	0,010	0,013	0,011	0,012	0,011
3,11E+02	0,013	0,009	0,009	0,008	0,011	0,010	0,013	0,011	0,012	0,011
2,22E+02	0,014	0,008	0,009	0,007	0,011	0,010	0,013	0,011	0,012	0,011
1,59E+02	0,014	0,008	0,009	0,007	0,011	0,010	0,013	0,011	0,012	0,011
1,13E+02	0,014	0,008	0,009	0,007	0,011	0,010	0,014	0,011	0,013	0,012
8,10E+01	0,014	0,008	0,009	0,007	0,011	0,010	0,014	0,012	0,013	0,012
5,78E+01	0,015	0,008	0,009	0,007	0,011	0,010	0,014	0,012	0,013	0,012
4,13E+01	0,014	0,008	0,009	0,007	0,011	0,010	0,014	0,012	0,014	0,012
2,95E+01	0,015	0,008	0,009	0,007	0,012	0,010	0,015	0,012	0,014	0,013
2,11E+01	0,016	0,009	0,009	0,007	0,012	0,011	0,015	0,013	0,014	0,013
1,51E+01	0,016	0,009	0,010	0,007	0,012	0,011	0,016	0,013	0,014	0,013
1,08E+01	0,017	0,009	0,010	0,007	0,013	0,011	0,017	0,013	0,015	0,014
7,68E+00	0,018	0,009	0,010	0,007	0,013	0,012	0,017	0,014	0,015	0,014
5,49E+00	0,019	0,009	0,011	0,007	0,013	0,012	0,018	0,014	0,016	0,015
3,92E+00	0,020	0,009	0,011	0,008	0,014	0,012	0,018	0,015	0,016	0,015
2,80E+00	0,021	0,010	0,011	0,008	0,014	0,013	0,019	0,015	0,017	0,016
2,00E+00	0,022	0,010	0,012	0,008	0,015	0,013	0,020	0,016	0,017	0,017
1,43E+00	0,024	0,010	0,012	0,009	0,015	0,014	0,020	0,017	0,018	0,017
1,02E+00	0,026	0,011	0,013	0,010	0,017	0,014	0,022	0,017	0,018	0,018
7,29E-01	0,029	0,011	0,015	0,010	0,018	0,016	0,021	0,018	0,020	0,019
5,21E-01	0,032	0,012	0,017	0,011	0,019	0,017	0,023	0,020	0,020	0,020
5,00E-01	0,035	0,012	0,018	0,012	0,021	0,019	0,030	0,022	0,022	0,022

Tab. 6.24 Změřené hodnoty relativní permitivity nestárnuté EP

Nestárnutá EP								
T (°)	1	2	3	4	5	6	7	8
30	3,388	3,429	3,264	3,328	3,462	3,712	3,68	3,576
40	3,509	3,545	3,342	3,411	3,547	3,799	3,774	3,669
50	3,693	3,733	3,5	3,636	3,755	4,023	4	3,998
60	5,369	5,463	4,972	5,838	5,471	5,966	5,81	5,942
70	6,254	6,29	5,724	6,665	6,307	6,955	6,787	6,834
80	6,704	6,787	6,246	6,741	6,7	7,271	6,974	6,885

Nestárnutá EP							
9	10	11	12	13	14	15	\bar{x}
3,651	3,12	3,872	3,951	3,579	3,684	3,564	3,550667
3,744	3,194	4,03	4,106	3,657	3,755	3,631	3,647533
3,981	3,367	4,912	5,165	3,967	3,941	3,768	3,9626
5,782	4,784	6,491	6,617	5,937	5,689	5,178	5,687267
6,77	5,587	7,056	7,07	6,869	6,632	6,356	6,543733
7,159	5,941	7,1	7,04	6,878	6,814	6,731	6,798067

Tab. 6.25 Změřené hodnoty relativní permitivity nestárnuté EP potvrzené

Nestárnutá EP potvrzená					
T (°)	1	2	3	4	\bar{x}
30	3,288	3,121	3,207	3,275	3,22275
40	3,381	3,188	3,284	3,343	3,299
50	3,551	3,332	3,495	3,515	3,47325
60	4,441	3,986	4,617	4,496	4,385
70	5,424	4,897	5,696	5,454	5,36775
80	6,139	5,587	6,198	6,091	6,00375

Tab. 6.26 Změřené hodnoty relativní permitivity UV stárnuté EP

UV stárnutá EP						
T (°)	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	3,53	3,517	3,458	3,503	2,992	3,4
40	3,645	3,599	3,552	3,591	3,068	3,491
50	3,867	3,816	3,917	3,818	3,22	3,7276
60	4,923	4,83	4,999	4,628	3,951	4,6662
70	6,137	5,908	6,07	5,826	4,841	5,7564
80	6,942	6,515	6,596	6,701	5,51	6,4528

Tab. 6.27 Změřené hodnoty relativní permitivity teplem stárnuté EP

Teplem stárnutá EP						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	3,608	3,715	3,287	3,486	3,383	3,4958
40	3,668	3,761	3,33	3,535	3,432	3,5452
50	3,765	3,834	3,405	3,606	3,502	3,6224
60	4,315	4,186	3,815	3,863	3,767	3,9892
70	5,525	5,29	5,204	4,771	4,691	5,0962
80	7,746	7,441	7,422	6,656	6,647	7,1824

Tab. 6.28 Změřené hodnoty relativní permitivity 1% EP

1% plnění nestárnuté EP						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	3,42	3,621	3,46	3,386	3,486	3,4746
40	3,613	3,759	3,575	3,516	3,59	3,6106
50	4,365	4,491	4,158	4,418	4,182	4,3228
60	5,755	6,354	5,889	6,204	5,748	5,99
70	6,562	6,672	6,72	6,636	6,529	6,6238
80	6,881	6,618	6,922	6,598	6,955	6,7948

Tab. 6.29 Změřené hodnoty relativní permitivity 1% EP dotvrzené

1% plnění nestárnuté EP dotvrzená						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	3,376	2,651	3,457	3,424	3,438	3,2692
40	3,496	2,738	3,567	3,554	3,527	3,3764
50	3,833	2,953	3,864	3,992	3,812	3,6908
60	4,847	3,649	4,972	5,135	4,738	4,6682
70	5,964	4,466	6,095	6,126	5,809	5,692
80	6,64	5,007	6,764	6,429	6,579	6,2838

Tab. 6.30 Změřené hodnoty relativní permitivity 1% UV stárnuté EP

1% plnění UV stárnutou EP						
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	5	\bar{x}
30	3,276	3,527	3,531	3,157	3,56	3,4102
40	3,531	3,803	3,865	3,356	3,839	3,6788
50	4,558	5,032	5,34	4,335	5,206	4,8942
60	5,945	6,108	6,399	5,326	6,555	6,0666
70	6,954	6,79	6,497	5,818	6,916	6,595
80	7,132	7,03	6,44	6,065	6,864	6,7062

Tab. 6.31 Změřené hodnoty relativní permitivity 1% UV stárnuté EP dotvrzené

1% plnění UV stárnutou EP dotvrzená					
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	\bar{x}
30	3,41	3,477	3,151	3,526	3,391
40	3,536	3,63	3,263	3,693	3,5305
50	4,186	4,382	3,808	4,431	4,20175
60	5,381	5,701	4,804	5,857	5,43575
70	6,402	6,356	5,481	6,685	6,231
80	6,964	6,422	5,877	6,849	6,528

Tab. 6.32 Změřené hodnoty relativní permitivity 1% teplem stárnuté EP

1% plnění teplem stárnutou EP					
$T (^{\circ})$	1	2	3	4	\bar{x}
30	3,585	3,323	3,521	3,298	3,43175
40	3,829	3,496	3,721	3,485	3,63275
50	5,16	4,398	4,784	4,53	4,718
60	6,357	5,523	6,123	5,71	5,92825
70	6,962	6,101	6,774	6,232	6,51725
80	7,239	6,548	7,018	6,509	6,8285

Tab. 6.33 Změřené hodnoty relativní permitivity 1% teplem stárnuté EP dotvrzené

1% plnění teplem stárnutou EP dotvrzená				
$T (^{\circ})$	1	2	3	\bar{x}
30	3,471	3,261	3,427	3,386333
40	3,593	3,348	3,533	3,491333
50	3,91	3,618	3,838	3,788667
60	5,141	4,676	4,929	4,915333
70	6,14	5,54	6,005	5,895
80	6,811	6,111	6,675	6,532333

Tab. 6.34 Změřené a dopočítané hodnoty pro meze pevnosti všech EP

Nestárnutá EP				Nestárnutá EP dotvrzená			
Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)	Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)
1	466,15	9,64	48,36	1	383,87	9,68	39,66
2	438,62	8,40	52,22	2	318,11	8,92	35,66
3	365,12	9,84	37,11	3	374,06	9,72	38,48
4	420,42	8,32	50,53	4	349,54	9,36	37,34
5	470,58	9,72	48,41	5	275,00	8,68	31,68
6	248,97	8,80	28,29	6	345,65	9,68	35,71
7	407,62	9,24	44,11	7	358,06	8,76	40,87
8	394,01	8,80	44,77	8	340,48	9,54	35,69
9	367,45	9,44	38,92	9	320,01	9,12	35,09
10	433,14	9,20	47,08	10	265,45	8,08	32,85

UV stárnutá EP				Teplem stárnutá EP			
Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)	Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)
1	433,42	10,10	42,91	1	163,08	9,40	17,35
2	262,47	9,40	27,92	2	135,71	9,04	15,01
3	288,11	9,52	30,26	3	220,93	9,28	23,81
4	402,65	9,25	43,53	4	172,43	9,00	19,16
5	369,58	10,72	34,48	5	247,91	8,76	28,30
6	392,09	9,31	42,11	6	119,00	9,60	12,40
7	494,68	10,88	45,47	7	196,37	9,68	20,29
8	456,20	10,24	44,55	8	202,32	9,00	22,48
9	272,22	8,00	34,03	9	123,27	9,36	13,17
10	306,71	8,51	36,04	10	176,24	9,14	19,28

Tab. 6.35 Změřené a dopočítané hodnoty pro meze pevnosti plněných EP

1% plnění nestárnuté EP				1% plnění nestárnuté EP dotvrzená			
Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)	Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)
1	261,52	8,68	30,13	1	335,59	9,23	36,36
2	345,75	9,48	36,47	2	404,39	10,36	39,03
3	392,11	9,24	42,44	3	367,97	8,56	42,99
4	263,62	7,64	34,51	4	283,60	8,96	31,65
5	398,19	9,76	40,80	5	393,32	8,92	44,09
6	238,39	9,28	25,69	6	406,15	9,15	44,39
7	312,98	9,82	31,87	7	328,97	8,84	37,21
8	404,99	10,00	40,50				
9	381,53	9,50	40,16				

1% plnění UV stárnutou EP				1% plnění UV stárnutou EP dotvrzená			
Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)	Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)
1	303,17	9,72	31,19	1	276,94	8,56	32,35
2	320,70	9,13	35,13	2	306,66	8,72	35,17
3	218,12	9,51	22,94	3	340,42	8,92	38,16
4	350,02	9,72	36,01	4	259,62	9,04	28,72
5	213,09	7,52	28,34	5	291,78	9,08	32,13
6	231,17	7,96	29,04	6	241,26	7,68	31,41
7	252,95	9,18	27,55	7	356,61	9,56	37,30
8	283,46	8,29	34,19				

1% plnění teplem stárnutou				1% plnění teplem stárnutou dotvrzená			
Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)	Vzorek	F_{max} (N)	S_0 (mm ²)	σ_m (MPa)
1	319,00	10,29	31,00	1	413,80	9,48	43,65
2	552,72	17,40	31,77	2	411,05	10,61	38,74
3	384,06	9,12	42,11	3	412,49	10,28	40,13
4	344,63	10,44	33,01	4	331,74	9,92	33,44
5	330,34	10,04	32,90	5	329,69	9,94	33,17
6	347,42	10,60	32,78	6	424,79	9,93	42,78
7	371,16	10,04	36,97	7	364,90	9,40	38,82
8	355,71	10,58	33,62	8	344,62	9,12	37,79
9	353,50	9,24	38,26	9	351,27	9,90	35,48