



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DEGRADACE EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC S RŮZNÝMI PLNIVY SLUNEČNÍM ZÁŘENÍM

DEGRADATION OF EPOXY RESINS WITH VARIOUS ADDITIVES BY SOLAR RADIATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lenka Škarabelová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

BRNO 2018

Diplomová práce

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

Ústav elektrotechnologie

Studentka: Bc. Lenka Škarabelová

ID: 164418

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Degradace epoxidových pryskyřic s různými plnivy slunečním zářením

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte základy chemických a fyzikálních vlastností dielektrických materiálů se zaměřením na epoxidové pryskyřice. Seznamte se s vybranými diagnostickými metodami a navrhnete vhodnou metodiku měření vlastností epoxidových pryskyřic s různými plnivy, ovlivněných slunečním zářením.

Proměřte dané vzorky materiálů a porovnejte dosažené výsledky s teoretickými předpoklady, zhodnoťte vlastnosti vybraných látek a celkově dané téma.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.5.2018

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

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na prostudování chemických a fyzikálních vlastností dielektrických materiálů se zaměřením na epoxidové pryskyřice. Jsou zde zahrnuty možné vlivy, které mohou ovlivňovat vlastnosti epoxidových pryskyřic, a to jak procesy, které zlepšují vlastnosti polymerů, tak i procesy, které způsobují degradaci materiálu. Další částí práce je pak popis diagnostických metod vhodných pro měření základních elektrických veličin materiálu a návrh vhodné metody pro měření vlastností epoxidových pryskyřic s různými plnivy za ovlivnění vzorků slunečním zářením. V neposlední řadě práce zahrnuje experiment věnovaný degradaci epoxidových pryskyřic s různými plnivy vlivem slunečního záření a vyhodnocení zvoleného experimentu.

Klíčová slova

Elektrické vlastnosti dielektrických materiálů, Epoxidové pryskyřice, Degradací procesy epoxidových pryskyřic, Diagnostické metody měření elektrických veličin, Sluneční záření, Vlivy slunečního záření.

Abstract

This master's thesis is focused on the study of chemical and physical properties of dielectric materials with main focus on epoxy resins. It includes possible processes that can influence the properties of epoxy resins, both processes that improve polymer properties and processes that cause material degradation. Next part of the thesis is a description of diagnostic methods suitable for measurement of basic electrical quantities of material and design of a suitable method for measuring properties of epoxy resins with different additives, influencing the samples by solar radiation. At the end, the work includes an experiment dedicated to the degradation of epoxy resins with various additives by solar radiation and the evaluation of the experiment.

Keywords

Electrical properties of dielectric materials, Epoxy resins, Degradation processes of epoxy resins, Diagnostic methods for measuring electrical quantities, Solar radiation, Effects of solar radiation.

Bibliografická citace mé práce:

ŠKARABELOVÁ, L. *Degradace epoxidových pryskyřic s různými plnivy slunečním zářením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 73 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že moji diplomovou práci na téma „**Degradace epoxidových pryskyřic s různými plnivy slunečním zářením**“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 22. 05. 2018

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Kazellemu, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

Obsah

Úvod.....	8
1. Teoretická část.....	9
1.1 Základní elektrické vlastnosti dielektrik	9
1.1.1 Relativní permitivita	9
1.1.2 Ztrátový činitel	9
1.1.3 Teplota skelného přechodu	11
1.2 Chemické a fyzikální vlastnosti epoxidových pryskyřic.....	11
1.2.1 Chemické vlastnosti.....	11
1.2.2 Mechanické vlastnosti	13
1.2.3 Tepelné vlastnosti	13
1.2.4 Vliv aditiv epoxidových pryskyřic.....	15
1.2.5 Vliv prostředí.....	15
1.3 Degradční procesy polymerů.....	15
1.3.1 Vliv klimatických činitelů	15
1.3.2 Vliv změn prostředí	17
1.3.3 Vliv biologických činitelů	17
1.4 Diagnostické metody pro měření permitivity, ztrátového činitele a rezistivity	17
1.4.1 Měření na Scheringově můstku	17
1.4.2 Měření rezonanční metodou Q-metrem	19
1.4.3 Měření ztrátového činitele rezonanční metodou	20
1.4.4 Měření voltampérovou metodou.....	21
1.5 Normy pro měření vlivu slunečního záření na polymerní materiály	22
1.5.1 ČSN EN ISO 4892-1	22
1.5.2 ČSN EN ISO 4892-2	22
1.5.3 ČSN EN ISO 4892-3	22
2. Experimentální část	23
2.1 Popis přístrojů pro experimentální část.....	23
2.1.1 Přístroj Q-SUN Xe-3 Xenon Test Chamber.....	23
2.1.2 Přístroj Novocontrol pro měření impedance	26
2.2 Testovací vzorky	28
2.3 Výchozí měření	29

2.3.1	Měření tloušťky vzorků	29
2.3.2	Nastavení měřicích podmínek na přístroji Novocontrol	30
2.3.3	Výsledné hodnoty výchozího měření.....	30
2.4	Testování vzorků ve sluneční komoře.....	32
2.4.1	Nastavení základních parametrů měření	33
2.4.2	Naměřené hodnoty po otestování vzorků ve sluneční komoře	33
3.	Vyhodnocení experimentu.....	42
3.1	Porovnání výsledných hodnot s výchozími.....	42
	Závěr	45
	Seznam použité literatury	48
	Seznam obrázků	50
	Seznam tabulek.....	52
	Seznam symbolů	53
	Návrh laboratorní úlohy.....	55
	Seznam příloh	57

Úvod

Během doby života jsou elektrická zařízení vystavena vlivům okolí, které mohou nepříznivě ovlivňovat jejich materiálové vlastnosti a urychlit degradaci samotného zařízení. Mezi jeden z hlavních vlivů působící na elektrická zařízení je vliv slunečního záření, které v sobě obsahuje několik složek, které mohou nepříznivě ovlivnit funkčnost zařízení.

Směsi epoxidových pryskyřic s různými aditivami se v současné době velmi hojně používají především jako elektroizolační zalévací hmoty pro různá zařízení. Jelikož jsou mnohá z těchto zařízení umístěna ve vnějších podmínkách, je nutné, aby i elektroizolační hmoty byly schopny odolávat těmto vnějším vlivům. Z toho důvodu jsou tyto materiály před samotným použitím testovány, zdali vyhoví určené aplikaci a neztratí své materiálové vlastnosti.

Cílem diplomové práce je prostudovat základy chemických a fyzikálních vlastností dielektrických materiálů se zaměřením na epoxidové pryskyřice. Seznámit se s možnými degradačními procesy u epoxidových pryskyřic a jevy, které tyto procesy způsobují. Dále se seznámit s vybranými diagnostickými metodami a navrhnout vhodnou metodiku pro měření vlastností epoxidových pryskyřic s různými plnivými, ovlivněných slunečním zářením.

1. Teoretická část

1.1 Základní elektrické vlastnosti dielektrik

Každý dielektrický materiál má své charakteristické materiálové vlastnosti, podle kterých lze určit jeho chování v různých prostředích, kterým může být materiál během provozu vystaven. V případě elektrických vlastností jsou mezi hlavní sledované veličiny řazeny relativní permitivita, ztrátový činitel a teplota skelného přechodu, které charakterizují možné chování elektroizolačních materiálů.

1.1.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita je konstantou úměrnosti mezi vektorem intenzity elektrického pole a vektorem elektrické indukce a používá se pro charakterizaci polarizačních dějů v materiálech. Pro vakuum je hodnota relativní permitivity rovna jedné, jelikož ve vakuu nemůže k polarizaci docházet. V případě jiných elektroizolačních látek pak nabývá hodnot vyšších než jedna, kdy pro plynné izolanty je tato hodnota o málo větší než jedna a pro kapalné a tuhé izolanty je pak v řádu jednotek až desítek. Její velikost je určena polarizačními mechanismy v materiálu a je teplotně i frekvenčně závislá, z toho důvodu je při jejím měření nutno zaznamenat podmínky okolí, za kterých byla měřena. [1]

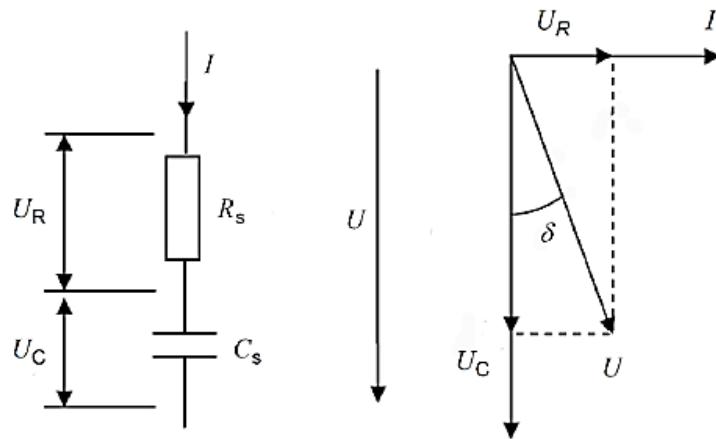
1.1.2 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel charakterizuje ztrátové vlastnosti daného dielektrika. Měření ztrátového činitele je důležité pro zhodnocení kvality zpracování a charakteru izolace ve smyslu možných změn dielektrika. Stejně jako permitivita, tak i ztrátový činitel je závislý na teplotě a kmitočtu. Ztrátový činitel $\tan\delta$ je roven tangentě „ztrátového“ úhlu při daném napětí, kmitočtu ω a teplotě. Ztráty izolačního systému lze charakterizovat paralelním nebo sériovým náhradním schématem. [2]

Výsledný ztrátový činitel je pak možno vyjádřit pomocí rovnice:

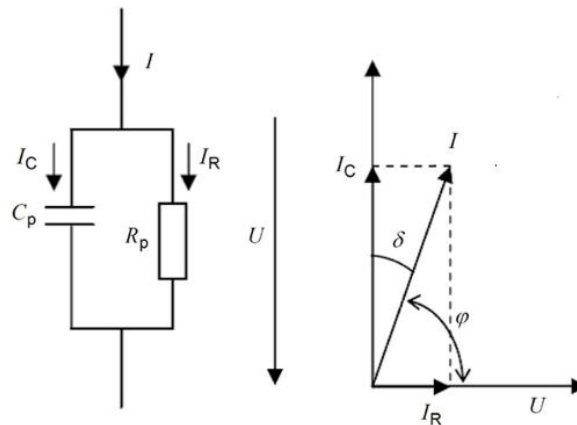
$$\tan\delta = \omega C_S R_S = \frac{1}{\omega C_P R_P}, \quad (1.1)$$

kde sériové náhradní schéma je v tomto vzorci zastoupeno sériovou kapacitou C_S a sériovým odporem R_S a paralelní schéma pak paralelní kapacitou C_P a paralelním odporem R_P . Kapacitní složky zastupují bezztrátovou kapacitu dané izolace a odporové složky zastupují ztrátové složky materiálu. [2]



Obr. 1.1: Náhradní schéma sériového obvodu a jeho vektorový diagram

Upraveno dle [2]



Obr. 1.2: Náhradní schéma paralelního obvodu a jeho vektorový diagram

Upraveno dle [2]

V případě zvyšujícího se zkušební napětí dochází k nárůstu dielektrických ztrát pevného izolačního materiálu a k částečným výbojům v dutinkách (nehomogenitách) uvnitř materiálu, které zapříčiňují nárůst ztrátového činitele. Měření ztrátového činitele se nejčastěji provádí za pomoci Scheringova můstku nebo s využitím Q-metru. Za kvalitní elektroizolační materiály jsou považovány ty materiály, u kterých je ztrátový činitel menší než $1 \cdot 10^{-2}$. [1, 2]

1.1.3 Teplota skelného přechodu

Teplota skelného přechodu (T_g) je jednou z nejdůležitějších vlastností polymerních materiálů. Teplota skelného přechodu je teplotní oblast, ve které se vlastnosti materiálu skokem mění ze sklovitého stavu a polymer nabývá kaučukovitých vlastností. Tato změna je zapříčiněna zvýšenou pohyblivostí makromolekul v materiálu. Teplota zesílení je závislá na několika faktorech, a to především na chemické struktuře materiálu. [3]

Pomocí T_g je možno sledovat stupeň sesíťování polymerního materiálu a během výrobního procesu sledovat složení polymeru a určit jeho výslednou teplotní odolnost. Při nižších teplotách, kdy jsou makromolekuly téměř nepohyblivé je materiál křehký a neohebný, kdežto při vyšších teplotách materiál je spíše kaučukovitý, a tedy měkčí a ohebnější. Platí, že čím menší je pohyblivost řetězce, tím je hodnota teploty skelného přechodu vyšší. [4, 5]

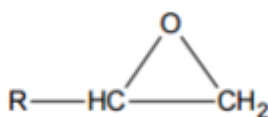
Tuto teplotu je možné ovlivnit, například přidáním změkčovadla (flexibilizátoru) do zalévací hmoty, které sníží síly mezi makromolekulami a tím dojde i ke snížení T_g . Dalším způsobem snížení T_g je přidání určitých skupin látek, jako jsou benzenová jádra nebo alifatické řetězce během procesu výroby. [6]

Pro určení teploty skelného přechodu je možno využít několika základních metod, z nichž nejčastějšími jsou DTA (Diferenční termická analýza) a DMA (Dynamická mechanická analýza). U epoxidových pryskyřic se teplota skelného přechodu pohybuje v teplotním rozmezí 50 - 150 °C. [4, 6]

1.2 Chemické a fyzikální vlastnosti epoxidových pryskyřic

1.2.1 Chemické vlastnosti

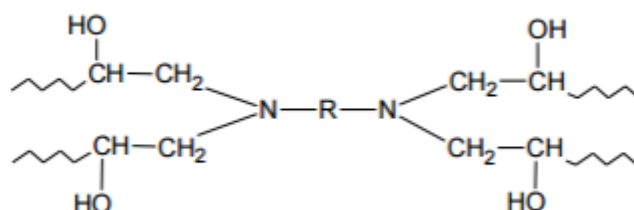
Epoxidové pryskyřice jsou polymery s řetězci obsahující více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Mezi jejich hlavní výhody patří velká adheze k většině ostatních materiálů, chemická odolnost, minimální smršťování při vytvrzování a značná reaktivita. Během vytvrzování dochází k adici epoxidových skupin na polyaminy, což vyžaduje polyaminy s minimálně třemi atomy vodíku, aby byl možný vznik sesíťované struktury. [7]



Obr. 1.3: Oxiranová (epoxidová) skupina

Zdroj: [8]

Chemická odolnost epoxidových pryskyřic stoupá s molekulovou hmotností a stupněm sesíťování. Sesíťováním je míněno, že jsou řetězce vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytváří trojrozměrnou prostorovou síť. Sesíťováním dochází u polymerů k zásadním změnám. Ztrácejí svoji rozpustnost, tavitelnost a termoplasticitu. Naopak pak získávají tvarovou stálost při vyšších teplotách a v některých případech pak vyšší chemickou odolnost. [9]



Obr. 1.4: Řetězec vytvrzené epoxidové pryskyřice

Zdroj: [8]

Makromolekulární řetězce mohou být lineárního nebo rozvětveného typu, případně uspořádané do prostorové sítě. Tyto řetězce nejsou tuhé útvary, ale vlivem neustálého pohybu jednotlivých segmentů nabývají různého geometrického uspořádání. Vlastnosti polymerů jsou pak závislé na jejich fázovém stavu, molekulové hmotnosti a chemickém složení. Makromolekulární řetězce se od nízkomolekulárních liší tím, že tyto řetězce nejsou stejné délky. Z distribuce molekulových hmotností lze vypočítat střední hodnotu molekulové hmotnosti. Molekulová hmotnost spolu s její distribucí charakterizují teplotu měknutí polymerů, rozpustnost, pružnost či pevnost a další odolnostní charakteristiky. [9]

V případě nízkomolekulárních typů epoxidových pryskyřic je možné je rozpustit v aromatických uhlovodících, vysokomolekulární epoxidové pryskyřice se pak nejčastěji rozpouštějí v ketonech či esterech. Epoxidové pryskyřice jsou velmi odolné zásadám a různým zředěným roztokům jak anorganických, tak i organických kyselin. Chemická odolnost závisí především na stupni sesíťování a molekulové hmotnosti. [9]

Pro vytvrzování epoxidových pryskyřic se nejčastěji využívá polyadice sloučenin s aktivním vodíkovým atomem. Nejčastějšími typy tvrdidel pro tento proces pak jsou polyaminy, polythioly či melaminoformaldehydové pryskyřice. [9]

V případě elektroizolačních zalévacích hmot roli tvrdidla nejčastěji zastupují anhydridy polykarboxylových kyselin. Pryskyřice, které jsou vytvrzeny těmito anhydridy jsou pak více odolné vůči navlhání. V případě tvrdidel s aromatickými jádry, pak pryskyřice získávají lepší teplotní odolnost v porovnání s tvrdidly alifatickými. Jejich vytvrzení trvá několik hodin při teplotách od 100 °C do 200 °C. [9]

Další látkou, která může ovlivnit výsledné chemické vlastnosti epoxidových pryskyřic je změkčovaadlo, které se do této směsi přidává při procesu vytvrzování. Je to málo těkavá organická látka, která propůjčuje polymerům tvárnost a ohebnost a snižuje teplotu jejich zesklnění a výslednou viskozitu taveniny. [9]

1.2.2 Mechanické vlastnosti

Epoxidové pryskyřice vynikají několika svými mechanickými vlastnostmi, jako je například pevnost ve smyku. Při mechanickém namáhání, kterým může být válcování, hnětení nebo mletí dochází ke styku se vzdušným kyslíkem, což zapříčiní degradaci polymerních řetězců a jejich zkracování. [9]

Mechanické degradace jsou nevratné procesy, které jsou pozorovatelné v makroskopickém měřítku. Tyto degradační mechanismy zahrnují praskání matrice, delaminaci, praskání vláken a neelastickou deformaci. Mechanické degradace se tedy výrazně podílí na ovlivňování výsledné tuhosti a pevnosti materiálu. [5]

Tyto degradace se také často podílí na korozním znehodnocování materiálů. Rychlost degradace závisí především na frekvenci pohybu, teplotě, přítomnosti kyslíku, charakteru a velikosti částic aditivních látek a na samotné struktuře polymeru. Při korozi za napětí může docházet ke vzniku jemných trhlinek a jejich postupnému růstu. Nepříznivě pak mohou působit i zpracovatelské vlivy, které způsobují vnitřní pnutí ve výrobku – nesprávná rychlost ochlazování při vytvrzování, nevhodně působící síly a jiné. [9]

1.2.3 Tepelné vlastnosti

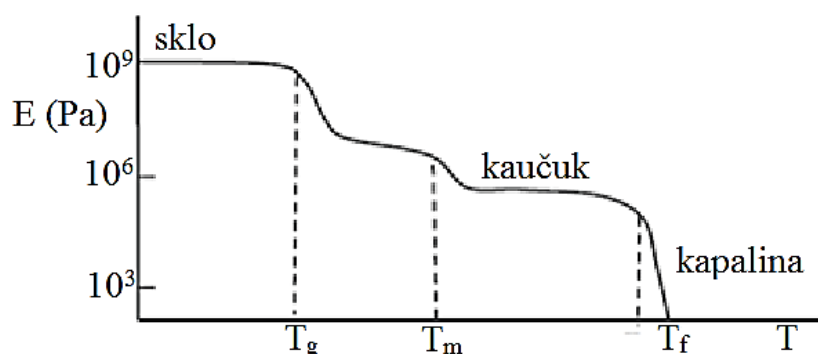
Při zahřívání může docházet k chemickým změnám makromolekul, jako je štěpení řetězců, síťování, oxidační nebo cyklizační reakce. Tyto reakce však mohou při vysokých teplotách zásadně změnit celkovou strukturu daných látek. Tvarová stálost u polymerů je popsána pomocí modulu pružnosti. [11]

Chování polymerních materiálů v závislosti na teplotě je ovlivňováno především tepelným pohybem makromolekulárních řetězců. U amorfních polymerů může docházet k translačnímu pohybu celých makromolekul, pohybu segmentů řetězců, pohybu několika atomů hlavního řetězce nebo k rovnovážné vibraci atomů. U polymerů v krystalické fázi jsou makromolekuly pravidelně uspořádány a v tomto případě může docházet pouze k rovnovážným vibracím atomů, případně k pohybu několika málo atomů z hlavního řetězce. U reálných krystalických polymerů je vždy částečně zastoupena i fáze amorfní, tedy se jedná o fázi semikrystalickou. [10]

Jednou z hlavních sledovaných veličin je elastická deformace, která je závislá na čase i teplotě a je možné ji určit pomocí Hookeova zákona. Tento zákon lze formulovat jako přímou úměrnost mezi napětím a poměrnou deformací a výsledná veličina je nazývána modulem pružnosti neboli Youngovým modulem.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.2)$$

- σ je normálové napětí,
- E je konstanta úměrnosti (Youngův modul pružnosti v tahu),
- ε je relativní prodloužení. [10]



Obr. 1.5: Závislost modulu pružnosti na teplotě u částečně krystalického polymeru (T_g – teplota skelného přechodu, T_m – teplota tání, T_f – teplota tečení)

Upraveno podle: [10]

Jelikož se u polymerů vyskytuje deformace i pod T_g , je nutno pro korektní výsledky měření vyhodnotit závislost deformace na čase při konstantním zatížení, nebo závislost deformace na zatížení při konstantní době působení zatížení při různých teplotách. Nejčastěji to bývá prováděno tak, že je vzorek vystaven konstantnímu zatížení při stoupající teplotě po dobu, než dosáhne stanovené deformace. Z toho měření jsou následně získány hodnoty, které se používají jako míra tvarové stálosti za tepla. [11]

1.2.4 Vliv aditiv epoxidových pryskyřic

Polymerní materiály s aditivou neboli kompozity jsou struktury, které vzniknou spojením dvou nebo více materiálů s odlišnými vlastnostmi. Jako aditiva mohou být použita plniva částicová, vyztužující, nebo nanoplňiva. [7, 9]

Částicová plniva mají tu vlastnost, že zvyšují viskozitu taveniny, zvyšují její tvrdost, tuhost a tepelnou odolnost. Vyztužující aditiva zvyšují u kompozitu jeho pevnost, tuhost a tvarovou stálost, ale naopak snižují jeho ohebnost a tažnost. [7, 9]

V případě nanoplňiv dochází ke zlepšení mechanických vlastností kompozitu. Lze jimi nahradit částicová minerální a vláknitá plniva i retardéry hoření. Mezi jejich další výhody pak spadá odolnost vůči chemikáliím či zvýšení jakosti povrchu a lesku, avšak vždy záleží na aplikaci jejich použití a výsledné struktuře kompozitu. [7, 8]

1.2.5 Vliv prostředí

Mezi nejvýznamnější vlivy prostředí patří vlivy povětrnosti, tepla, slunečního záření, ionizačního záření, mechanické a elektrické vlivy. Během působení těchto vlivů může docházet k chemickým i fyzikálním změnám, a to vratným i nevratným. V případě chemických změn může docházet k odbourávání nebo ke zvětšování makromolekul a ke změnám doprovodných látek (změkčovadla, aditiva apod.). Co se týče změn fyzikálních, může docházet ke změnám krystalické struktury, odpařování, difúzi, absorpci nebo iontové výměně. [11]

1.3 Degradční procesy polymerů

K degradaci, tedy změnám fyzikálních a chemických vlastností materiálu dochází během doby životnosti materiálů, a to za působení komplexních vlivů a podmínek, jimž je materiál vystaven. Postupně dochází ke znehodnocování materiálu a trvalému zhoršení funkčních vlastností.

1.3.1 Vliv klimatických činitelů

Při působení slunečního záření dochází k absorpci fotonů elektromagnetického záření, což zapříčiní fotochemické reakce, které mohou vést až k odbourávání polymerů. UV záření činí přibližně 5 % podíl z celkové sluneční radiace, která dopadá na povrch Země. Na polymery má pak největší vliv UV záření, které má vlnovou délku 290-400 nm, kdy jeho intenzita stoupá s výškou od zemského povrchu. Velikost změn vlastností polymerů závisí především na intenzitě sluneční energie než na samotné době vystavení slunečnímu záření. V případě absorpce UV-záření pak může docházet k několika změnám struktury, kdy může docházet k Ramanovým vibracím elektronů, atomů i molekul, nebo může dojít k roztržení vazby apod. [11]

Při absorpci kvanta světleného záření dojde k aktivovanému stavu makromolekul. Díky této aktivaci pak následně může dojít k nárazu molekuly do jiné, případně může získanou energii uvolnit fluorescencí, fosforescencí nebo teplem. Nejčastěji však při tomto stavu dochází k vyvolání fotochemické reakce materiálu, kterou může být štěpení nebo síťovací reakce. [9]

Mezi podstatné faktory způsobující degradaci se dále řadí IR-záření, které je zastoupeno 50 % ve slunečním záření. IR-záření zvyšuje povrchovou teplotu, což přispívá k destrukci polymerů, závisí však na intenzitě slunečního záření. Samo IR-záření není dostatečné k termické degradaci, ale zvyšuje rychlost oxidačních a fotochemických procesů a hydrolýzy. [11]

Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující polymery je voda, která způsobuje odbourávání polymerů. Voda, která se dostane do vnitřní struktury, může působit jako změkčovadlo, nabobtnat nebo rozrušit některé polymery. Dalším účinkem vody je možný růst mikroorganismů, které následně mohou odbourávat polymery. [11]

Jedním z hlavních vlivů je i vlhkost, která je zastoupena v atmosféře. Při styku pevné látky s vlhkostí může dojít buď k adsorpci vody na povrchu látky, nebo adsorpci do objemu látky. V obou případech následně dojde ke zhoršení dielektrických vlastností materiálu, především ke zrychlení koroze materiálu. Pokud je vlhkost příliš nízká může naopak docházet k vysušování materiálu, deformacím a povrchovým změnám materiálu. [12]

V neposlední řadě lze mezi významnější vlivy zařadit i kyslík, který je zastoupen v ovzduší přibližně 21 %. Kyslík podporuje oxidační a redukční procesy, zvyšuje rychlost stárnutí izolačních částí na organické bázi a urychluje atmosférickou korozi převážně kovových materiálů. Během oxidace může v materiálu docházet ke štěpení řetězců a sesíťování. Reaktivita s kyslíkem se s počtem dvojných vazeb v hlavním řetězci zvyšuje. Jeho účinek se zvětšuje za působení vlhkosti či znečištění atmosféry. [11, 12]

Mezi další vlivy se pak může řadit vítr, který sám o sobě nemá příliš velký vliv na degradaci, avšak přenáší atmosférické nečistoty jako je písek, prach, nebo saze, které mohou následně urychlit degradaci materiálu. Epoxidové pryskyřice jsou schopny dlouhodoběji odolávat těmto účinkům, avšak velký vliv na tuto odolnost mají výchozí suroviny, tvrdidla a aditiva. [9, 11]

1.3.2 Vliv změn prostředí

V případě kolísání teplot během dne pak dochází k rozměrovým změnám materiálu a ty mohou být příčinou vnitřního pnutí materiálu, případně vzniku trhlinek v materiálu. Střídáním teplot může docházet ke změnám krystalinity polymerů a tím ke změnám průběhu stárnutí, difúzi kyslíku a ozonu do materiálu. [11]

1.3.3 Vliv biologických činitelů

Nejčastějším jevem působícím na materiály ve spojení s biologickými činiteli je biologická koroze. V případě napadení daného polymerního materiálu mikroorganismy má velký vliv samotné chemické složení materiálu. Mikroorganismy způsobují naleptávání povrchu, kdy může dojít až k proděravění povrchové vrstvy. Některé mikroorganismy napadají jen určité složky materiálů, např. změkčovadla, zbytky emulgátorů nebo plniva obsažená v polymerech. U plniv jsou nejvíce náchylné biologické korozi plniva organická. [9]

1.4 Diagnostické metody pro měření permitivity, ztrátového činitele a rezistivity

Polymery mají své typické elektrické a mechanické vlastnosti, které se dají vyjádřit základními veličinami jako je relativní permitivita, ztrátový činitel, vnitřní a povrchová rezistivita, elektrická pevnost, měrná tepelná vodivost, tepelný součinitel délkové roztažnosti, pevnost v tahu a tlaku, viskozita a další.

Relativní permitivita nepatří mezi materiálové konstanty, jelikož se u ní vyskytuje časová, teplotní i frekvenční závislost, v případě feroelektrik pak i napěťová závislost. Při jejím měření je tedy nutné uvádět popis podmínek měření. Pro volbu měřicí metody je důležité určit, v jakém kmitočtovém pásmu budou hodnoty měřeny a také přesnost daného měření. Metody měření relativní permitivity je možné rozdělit na metody měření relativní permitivity a ztrátového činitele v elektrodovém systému, který tvoří kapacitu a dále pak metody měření komplexní permitivity v mikrovlnném pásmu. V této kapitole jsou dále rozepsány metody měření za pomoci elektrodového systému. [1]

1.4.1 Měření na Scheringově můstku

Scheringova můstku se nejčastěji využívá pro měření relativní permitivity a ztrátového činitele izolantů v kmitočtové oblasti 50 Hz.

Zapojení Scheringova mostu se skládá ze čtyř větví, kdy dvě slouží jako kapacitní (kapacity C_V a C_N) a další dvě větve slouží jako měřicí (odpory R_1 a R_2). Zkoumaný vzorek (kondenzátor C_V) je v obvodu nahrazen sériově zapojeným rezistorem R_S s kondenzátorem C_S . Pro vyvažování můstku slouží pomocné prvky, kterými jsou

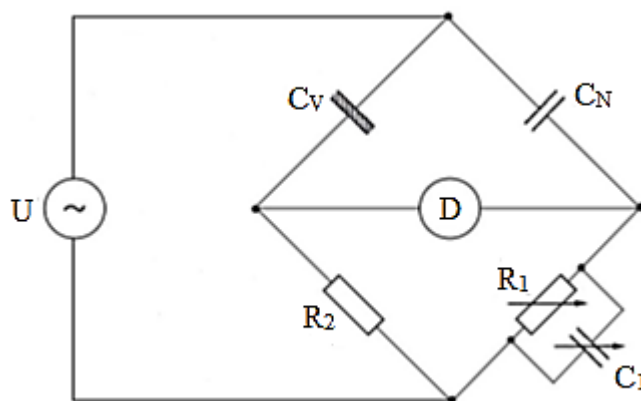
rezistory R_1 , R_2 a kondenzátor C_1 . Poslední částí obvodu pak je normálový kondenzátor C_N , který je bez dielektrických ztrát. Pak platí:

$$C_S = C_N \frac{R_1}{R_2}, \quad (1.3)$$

$$R_S = R_2 \frac{C_1}{C_N}, \quad (1.4)$$

$$\tan\delta = \omega C_S R_S = \omega C_1 R_1, \quad (1.5)$$

kde $\omega = 2\pi f$, což je úhlový kmitočet,
 $\tan\delta$ je ztrátový činitel. [13]



Obr. 1.6: Scheringův můstek – schéma zapojení

Upraveno podle: [13]

Pro získání reálné části komplexní permitivity lze použít vzorec:

$$\varepsilon' = \frac{C_S}{C_0}. \quad (1.6)$$

V tomto vzorci je C_0 geometrická kapacita, kterou lze vypočítat:

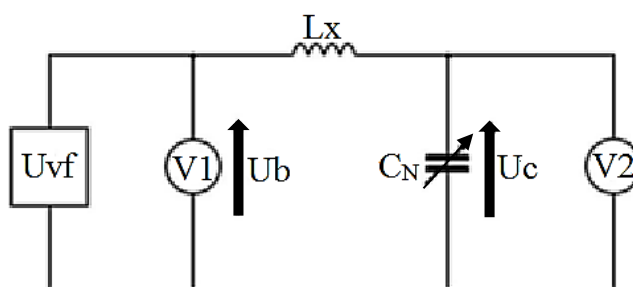
$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S_{ef}}{h} = \varepsilon_0 \frac{\pi (D_1 + Bc)^2}{4h}, \quad (1.7)$$

kde ε_0 je permitivita vakua,
 S_{ef} je efektivní plocha měřicí elektrody,
 D_1 je průměr měřicí elektrody,
 c je vzdálenost mezi ochrannou a měřicí elektrodou,
 h je tloušťka vzorku,
 B je součinitel elektrodového systému. [13]

1.4.2 Měření rezonanční metodou Q-metrem

Měření za pomoci Q-metru se řadí mezi rezonanční metody s použitím přímého měření nakmitaného napětí na rezonančním obvodu. Nejčastěji se této metody využívá při měření v kmitočtovém pásmu 10 kHz až 260 MHz. Měřicí obvod se skládá z měřené cívky a vestavěného nízko ztrátového ladícího kondenzátoru a udává činitel napěťového nakmitání rezonančního obvodu. Základním prvkem obvodu je vysokofrekvenční generátor, který napájí rezonanční obvod přes vhodný vazební člen a na vstupu vytváří napětí U_b , které je udržováno na konstantní hodnotě. Za pomoci ladícího kondenzátoru C_N se obvod nastaví do rezonance a napětí na kondenzátoru vzroste na hodnotu napětí U_c . Napěťový činitel lze pak vyjádřit pomocí rovnice:

$$Q_f = \frac{U_c}{U_b} \cdot [1] \quad (1.8)$$



Obr. 1.7: Schéma zapojení Q-metru – základní princip
Upraveno podle: [1]

Pro měření relativní permitivity a ztrátového činitele je vzorek uložen do měřicího přípravku, který je tvořen dvouelektrovým mikrometrickým kondenzátorem. V uvedeném schématu (Obr. 1.8) je zkoumaný vzorek zastoupen paralelním zapojením kondenzátoru C_P a ztrátového rezistoru R_P . K získání hodnot relativní permitivity vzorku se použijí hodnoty R_P a C_P , které byly získány z dvojího měření činitele jakosti Q obvodu, jednou se vzorkem a podruhé bez něj. V prvním měření je vzorek uložen do měřicího přípravku, kdy vzdálenost elektrod je rovna tloušťce měřeného vzorku h . Jakmile je obvod vyladěn do rezonance je následně možné odečíst údaj Q_1 obvodu a kapacitu ladícího kondenzátoru C_N . Při druhém měření se po vyjmutí vzorku z přípravku postupně zmenšuje vzdálenost elektrod kondenzátoru do té doby, dokud není opětovně dosaženo rezonance. V tomto momentu je kapacita vzduchového kondenzátoru se vzdáleností desek c rovna kapacitě kondenzátoru se vzorkem o tloušťce h . Následně je možno z přístroje odečíst údaj Q_2 obvodu. Výpočet relativní permitivity je pak určen z podmínky rovnosti kapacity měřicího přípravku se vzorkem C_P a kapacity vzduchového kondenzátoru C_0 ve vzdálenosti elektrod c . [1]

$$C_P = \varepsilon_0 \varepsilon' \frac{S}{h}, \quad (1.9)$$

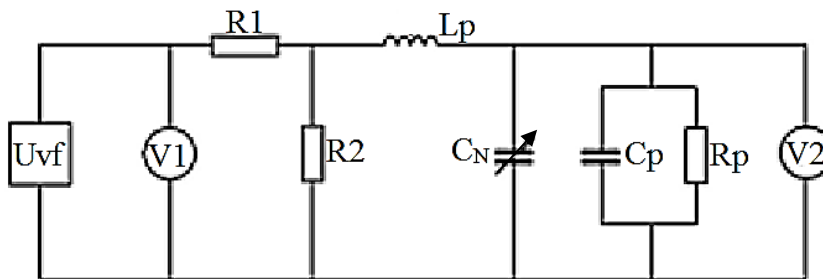
$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{c}, \quad (1.10)$$

$$\varepsilon' = \frac{h}{c}. \quad (1.11)$$

K získání hodnoty ztrátového činitele lze pak použít vzorec:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega R_P C_P}, \quad (1.12)$$

kde $\omega=2\pi f$ je úhlový kmitočet,
 ε_0 je permitivita vakua. [1]



Obr. 1.8: Schéma zapojení Q-metru s měřicím přípravkem
 Upraveno podle: [1]

1.4.3 Měření ztrátového činitele rezonanční metodou

Měřicí obvod je tvořen paralelním rezonančním obvodem, který se skládá z normálového ladicího kondenzátoru C_N a indukčnosti L_N , která lze nastavovat po skocích za pomoci přepínače. K rezonančnímu obvodu je pak připojen normálový odpor R_N , který slouží k substitučnímu stanovení paralelní reálné složky měřené impedance. Obvod je napájen z vysokofrekvenčního generátoru konstantním proudem přes vazební kondenzátor a nakmitané napětí je měřeno voltmetrem s velkým výstupním odporem. Měřený vzorek je paralelně připojen k měřicímu obvodu a hodnoty náhradního paralelního obvodu jsou určeny dvojím měřením rezonance, substitucí. [14]

Pro měření rezistivity se využívají metody měření odporu, z kterého lze následně dopočítat výsledná rezistivita. Tyto metody lze rozdělit na metody přímé a porovnávací. V této kapitole je popsána voltampérová metoda, která se řadí mezi přímé metody a odpor vzorku je zde počítaný pomocí Ohmova zákona. Další metody pro zjištění rezistivity jsou pak ampér-metrová metoda nebo metoda Wheatstonova můstku, které se obě řadí mezi metody porovnávací. [13]

1.4.4 Měření voltampérovou metodou

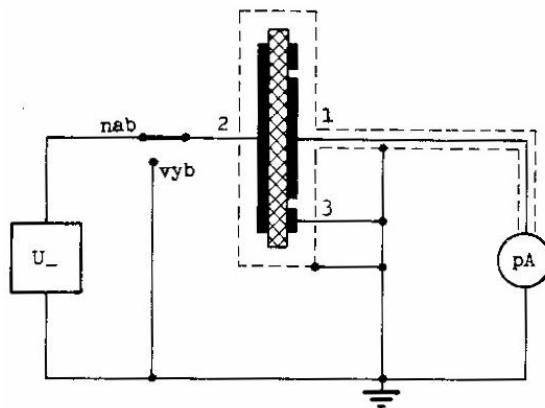
Základ této metody spočívá v měření proudu procházejícího vzorkem izolantu mezi měřicí a napěťovou elektrodou, pomocí vhodného pikoampérmetru. Výsledný odpor se následně vypočítá z Ohmova zákona ze známého proudu I a napětí U. [1]

$$R_v = \frac{U}{I} . \quad (1.13)$$

Z vypočítaného vnitřního odporu pak lze dopočítat hodnotu vnitřní rezistivity podle rovnice:

$$\rho_v = R_v \frac{S_{ef}}{h} , \quad (1.14)$$

kde R_v je vnitřní odpor,
 S_{ef} je efektivní plocha měřicí elektrody,
 h je tloušťka měřeného vzorku. [1]



Obr. 1.9: Schéma zapojení pro měření proudu při nabíjení a vybíjení vzorku

(1-měřicí, 2-napěťová, 3-ochranná elektroda)

Zdroj: [1]

1.5 Normy pro měření vlivu slunečního záření na polymerní materiály

V této kapitole jsou popsány vybrané normy pro měření vlivu slunečního záření na plasty a základní podmínky pro měření uvedené v těchto normách.

1.5.1 ČSN EN ISO 4892-1

Tato norma nese název „*Plasty – Metody vystavení plastů laboratorním zdrojům světla – Část 1: Obecné principy*“ a obsahuje popis základních podmínek měření a jejich následné vyhodnocení. Norma zahrnuje požadavky na laboratorní podmínky měření, kterými jsou například požadavky na použité zdroje záření, na teplotní senzory, na přípravky použité pro vytváření vlhkosti a další. Jsou zde také popsány požadavky na měřené vzorky, jejich tvar a umístění v měřicí komoře.

1.5.2 ČSN EN ISO 4892-2

Tato norma je pojmenována „*Plasty – Metody vystavení laboratorním zdrojům světla – Část 2: Xenonové lampy*“ a zahrnuje detailnější popis měření při vystavení vzorků zdrojům světla, kterými jsou xenonové lampy. Jsou zde popsány jak základní podmínky pro měření stejně jako v normě ČSN ISO 4892-1, ale navíc je zde uveden přímý postup měření při použití xenonových lamp jako zdroje záření. Jako další jsou zde pak uvedeny možné cykly měření vzorků ať pro měření vzorků ozářených simulujícím denním světlem, či ozářením vzorků za pomoci filtrů simulujících okenní sklo.

1.5.3 ČSN EN ISO 4892-3

Poslední normou této skupiny je pak norma „*Plasty – Metody vystavení laboratorním zdrojům světla – Část 3: Fluorescenční UV lampy*“, ve které je popsáno měření za použití fluorescenčních UV lamp jako hlavních zdrojů záření. Tak jako v předchozí normě jsou zde popsány základní požadavky na vzorky a měřicí komoru, tak postup samotné zkoušky a její vyhodnocení, nebo možnosti využití více cyklů zkoušky.

2. Experimentální část

Pro praktickou část této práce byl zvolen experiment, kdy se několik vybraných vzorků se známým složením vystavilo na určitou dobu specifickému simulovanému slunečnímu záření, přičemž hlavním zdrojem záření byly xenonové lampy umístěné ve sluneční komoře. Před i po vystavení vzorků tomuto záření u nich byly změřeny základní elektrické veličiny a po provedení testu následně porovnány a vyhodnoceny.

2.1 Popis přístrojů pro experimentální část

V této části práce, jsou popsány základní informace a nastavení přístrojů, které byly využity pro experimentální část diplomové práce.

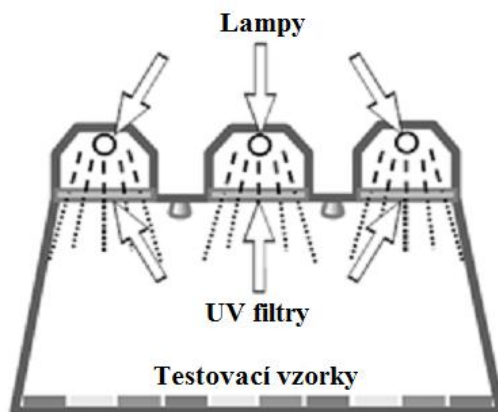
2.1.1 Přístroj Q-SUN Xe-3 Xenon Test Chamber

Tato testovací komora lze kromě testování polymerních materiálů využít i pro testování práškových nátěrů, provádění zkoušek těsnění pomocí umělé atmosféry, umělé zvětrávání a stárnutí plastů a elastomerů vystavením filtrovanému záření pomocí xenonového oblouku a za pomoci filtrů simulujících okenní sklo. V komoře je možné měřit účinky slunečního záření i bez použití filtrů. Tohoto měření bylo využito pro praktický experiment. Komora se skládá z několika částí, z nichž mezi hlavní se dají zařadit ozařovací xenonové lampy, rozprašovací trysky, senzory hlavních sledovaných veličin a další. [15]



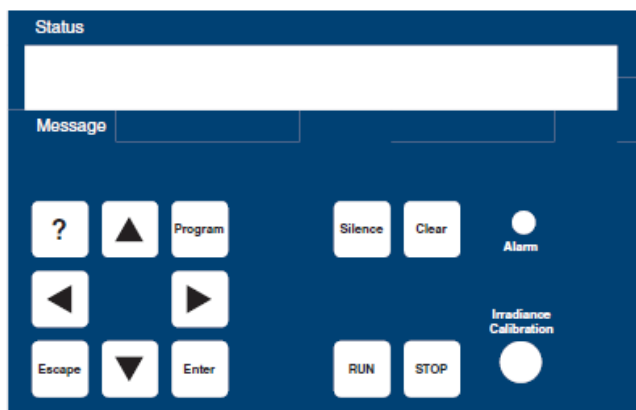
Obr. 2.1: Testovací komora Q-SUN Xe-3

Zdroj: [15]



Obr. 2.2: Uspořádání uvnitř testovací komory
Zdroj: [15]

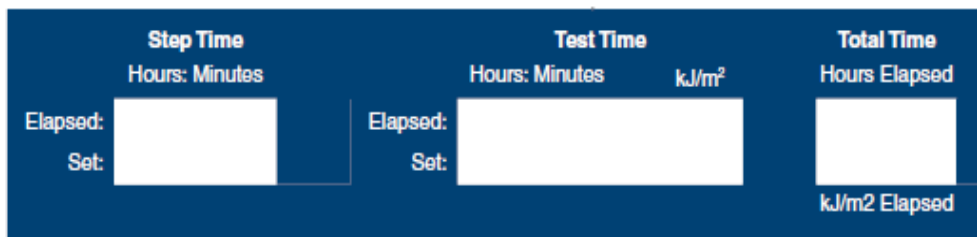
Hlavním základním ovládacím prvkem tohoto zařízení je několik oddělených displejů s tlačítky, kterými lze jednoduše upravovat potřebné podmínky pro dané měření a které zároveň ukazují měřené hodnoty v reálném čase. [15]



Obr. 2.3: Displej pro nastavení základních podmínek měření
Zdroj: [15]

Po stisknutí tlačítka [PROGRAM] lze pomocí šipek nahoru [↑] či dolů [↓] upravovat základní podmínky měření jako je nastavení délky trvání testu, nastavení cyklu, modifikovat, vytvořit nebo zrušit testovací cyklus, kalibrovat teplotní senzor a další. Pro potvrzení a uložení vybrané funkce slouží tlačítko [ENTER] a pro případné změny nastavovaných parametrů pak slouží šipky vpravo [→] a vlevo [←]. Tlačítko [ESCAPE] lze využít pro posunutí o jednu úroveň výše v daném programu. Pro diagnostický mód stačí stisknout klávesu [?] a opětovně za pomoci šipek vybrat z několika nabízených veličin, jako je teplota v laboratoři, hodiny do nejbližší kalibrace světelného senzoru apod.

Nastavené hodnoty na tomto základním ovládacím displeji se pak následně budou zobrazovat na dalších displejích, kde se zároveň ukazují i reálně naměřené hodnoty. [15]



Obr. 2.4: Displej zobrazující dobu cyklu, testu a celkový čas zkoušky
Zdroj: [15]



Obr. 2.5: Displej zobrazující vln. délku záření, teplotu černého panelu a relativní vlhkost
Zdroj: [15]

Při vkládání vzorků do testovací komory je důležité, aby vzorky v žádném případě nepřekrývaly černý panel, mohlo by tak docházet k přehřívání vzorků nebo k poškození černého panelu. Pro ploché vzorky, které byly použity i při navrhovaném měření pak slouží speciální držáky vzorků, do kterých se vzorky vloží a následně jsou umístěny spolu s držáky do určené oblasti komory. Celkem je možno do této komory umístit 26 držáků o rozměrech 50x100 mm, v případě větších držáků je pak možné do komory umístit 10 držáků o velikostech 75x150 mm, 8 držáků s rozměry 100x150 mm, nebo 6 držáků největší velikosti, tedy 100x200 mm. Při dlouhodobějším testování je vhodné, aby se pozice měřených vzorků postupně měnily v závislosti na délce měření. [15]

Tato komora se skládá i z několika senzorů, jako je senzor záření, senzor teploty černého panelu a senzor vlhkosti, které je nutné po určité době zkalibrovat, aby měření byla směrodatná.

Co se týče senzoru záření, jeho kalibrace by se měla provádět každých 500 hodin trvání měření a také při každé změně měřicích podmínek. K jeho kalibraci se používá kalibrační radiometr, který se připevní na dvířka komory, napájecí kabel se zasune do příslušného portu na základní desce komory a senzor radiometru se uloží do otvoru určeného pro tento senzor uvnitř testovací komory a následně se provede zkalibrování. [15]

V případě senzoru pro určování relativní vlhkosti by k jeho kalibraci mělo docházet jednou ročně, kdy se otevře testovací komora a senzor nacházející se v zadní části je vyjmut a následně přeinstalován tak aby odpovídal stanoveným hodnotám. [15]

Pro kalibraci černého panelu slouží kalibrační termometr a samotná kalibrace by měla být prováděna každých 6 měsíců, případně při změně UV filtrů nebo senzorů, či podmínek měření. Termometr se umístí na dvířka komory a příslušný kabel se připojí k černému panelu, který zůstává uložen na svém místě uvnitř komory. Komora se uzavře a je spuštěn program pro kalibraci černého panelu, který se vybere ze základní nabídky. [15]

2.1.2 Přístroj Novocontrol pro měření impedance

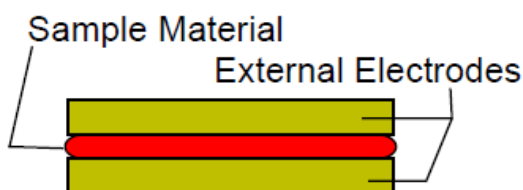
Přístroj od firmy Novocontrol Technologies je dielektrický, vodivostní a impedanční spektrometr sloužící pro analýzu materiálů. Je schopen měřit elektrické vlastnosti materiálů v širokém rozmezí frekvence a teploty. [16]

Základním principem je změření impedance kondenzátoru, který je tvořen dvěma nebo více elektrodami se vzorkovacím materiálem při kontrolované teplotě. Z této impedance jsou následně vyhodnocovány spektra komplexní permitivity a vodivosti. [16]

Hlavní součástí tohoto zařízení je počítač s daným softwarem WinDETA pro řízení, kterým je možno ovlivňovat základní nastavení měření, výkon a také zabraňuje nevhodným vstupům a stavům systému. Měření se nejčastěji provádí v závislosti na frekvenci a teplotě, avšak je možné změřit závislost i na jiných parametrech jako je doba sledování vytvrzovacích procesů, zkruslení nelineárních vlastností či tlak. [16]

Před samotným spuštěním měření je důležité nastavit základní parametry pro dané měření v systému WinDETA. V programu je možné definovat základní spouštěcí podmínky programu, rozsah frekvence, teploty, času a také stejnosměrného a střídavého napětí a proudu. [16]

Vzorek se následně umístí mezi pozlacené externí elektrody, které by měly mít v případě nízkofrekvenčního systému (pod 10 MHz) průměr od 40 do 10 mm. V případě RF systému (nad 1 MHz až po 3 GHz) je vhodné použít elektrody s průměrem od 12 mm do 3 mm. [16]



Obr. 2.6: Uspořádání elektrodového systému
Zdroj: [16]

Pro optimální výsledek měření by měla být kapacita vzorku pro nízkofrekvenční systémy volena v rozmezí od 50 pF do 200 pF ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 10 MHz. Pro vysokofrekvenční systémy lze pak optimálních výsledků dosáhnout u vzorků s kapacitou do 2 pF do 10 pF. V případě, pokud je známá relativní permitivita vzorku, je pak možné kapacitu dopočítat pomocí vzorce:

$$C_x = \varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\pi D^2}{4c}, \quad (2.1)$$

kde D je průměr měřicích elektrod,
 c je vzdálenost mezi elektrodami,
 C_x je kapacita elektrodového systému s vloženým vzorkem. [16]

Aby se minimalizovaly chyby měření vlivem tvaru vzorku, měl by být poměr c/D udržován co nejmenší, tedy průměr měřicích elektrod by měl být co největší a vzorek co nejtenčí. [16]

Před startem měření je následně vhodné zkontrolovat, zdali jsou všechna zařízení správně zapojena, vzorek správně upevněn k měřicímu systému a přídatná zařízení zapnuta, poté je možné spustit samotné měření. Naměřená data se následně mohou zobrazovat ve 2D nebo 3D diagramech a být uložena na disk. Podmínky měření je možné během samotného měření měnit a započít nové měření s nově nastavenými parametry. Systém samotný je schopný měřit v rozmezí teplot od -160 do 400 °C. [16]

2.2 Testovací vzorky

Pro následné testování byly vybrány vzorky technologicky vyrobené a upravené firmou SYNPO. Základní složkou vzorků je materiál CHS-EPODUR 494-1667, což je modifikovaná nízkomolekulární epoxidová pryskyřice, a k tomu jsou přidružena různá plniva. Jako základní složky byly použity: epoxidová pryskyřice (složka A), anhydridické tvrdidlo (složka B), urychlovač (složka C), flexibilizátor (složka D) a různé druhy mikromletých křemenných písků (viz. Tabulka 2.1)

Vzorky byly vyrobeny klasickým postupem pro zalévací směsi, tedy všechny složky byly vloženy do mísícího kotle (kromě urychlovače), a za teplot od 35-70 °C byly míseny a vyhřáty na požadovanou teplotu. Následně byl přidán urychlovač a směs byla opět smíchána, dokud nedosáhla finální konzistence. Po vytvrzení dané směsi dále následovala fáze chlazení, aby nedošlo k případnému tepelnému šoku a následnému popraskání odlitků. Poté byly změřeny finální mechanické, fyzikální a elektrické vlastnosti vzorků a zkontrolovány, zdali souhlasí se zadanými požadavky. V tomto případě u výsledných vlastností mají zásadní roli přidaná aditiva, která ve velké míře ovlivňují výslednou strukturu vzorků.

Sada vzorků 1847 má za aditivum Silbond, což je látka složená převážně z oxidu křemičitého ($\text{SiO}_2 = 99 \%$) a dalších sloučenin, které jsou zastoupeny v menšinovém podílu ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,5 \%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,05 \%$; $\text{CaO}+\text{MgO} = 0,1 \%$; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 0,1 \%$).

U sady 1848 byl přídatnou látkou Wollastonitmehl TREMIN 283-100 EST, což je látka, kde mají hlavní zastoupení oxid křemičitý ($\text{SiO}_2 = 51 \%$) a oxid vápenatý ($\text{CaO} = 45 \%$) a zbylá procenta zastoupení opětovně zbývají na menšinové sloučeniny ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 1 \%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,3 \%$; $\text{MgO} = 1 \%$; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 0,1 \%$).

V případě sady 1849 jsou zde dvě aditiva, kdy prvním je ST6, což je obchodní název pro sklopísek Střeleč, který se vyznačuje vysokým podílem oxidu křemičitého, který je majoritní složkou a dosahuje hodnoty 99,6 % v celkovém složení (zbylá procenta připadají na: $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,03 \%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,2 \%$; $\text{CaO}+\text{MgO} = 0,1 \%$; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 0,1 \%$). Druhým aditivem je pak Apyral, který je převážně složen z hydroxidu hlinitého ($\text{Al}(\text{OH})_3 = 99,7 \%$).

Stejně jako u předchozí sady, tak i sada 1850 je kombinací dvou aditiv, z nichž prvním je Silbond, který je hlavní složkou u sady 1847 a další příměsí je Hydrafil Trefil 744-300 EST, který podobně jako Apyral je složen převážně z hydroxidu hlinitého (99,5 %).

Poslední sadou vzorků je sada 1851, ve které je jako aditivum zastoupen sklopísek ST6, který je v poměrném množství zastoupen i u sady 1849.

Tabulka 2.1: Popis složení testovacích vzorků

Sada vzorků	CHS-EPODUR 494-1667				Pigmentová pasta	Plnivo písek*					
	Složka A	Složka B	Složka C	Složka D	BF135M	Silbond	Woll.	ST6/ Ap 60/ 240	Silbond/ Hyd 60/ 240	ST6	(%)
1847	100	85	0,6	17	3	435	-	-	-	-	67,9
1848	100	85	0,6	17	3	-	320	-	-	-	60,9
1849	100	85	0,6	17	3	-	-	380	-	-	64,9
1850	100	85	0,6	17	3	-	-	-	368	-	64,2
1851	100	85	0,6	17	3	-	-	-	-	382	65,0

*Silbond 126EST, Wollastonitmehl TREMIN 283-100EST, ST6, Apyral 2E, Hydrafil Trefil 744-300EST (složení je uvedeno v hmotnostních dílech na 100 dílů pryskyřice/ složky A).

2.3 Výchozí měření

Výchozí měření se sestávalo z měření průměrných tloušťek jednotlivých sad vzorků, nastavení programu Novocontrol, změření charakteristik relativní permitivity a ztrátového činitele a následného vyhodnocení daných charakteristik pro jednotlivé sady vzorků a jejich vyhodnocení po výchozím měření.

2.3.1 Měření tloušťky vzorků

Pro měření bylo použito pěti vzorků z každé sady vzorků (viz. Tabulka 2.1). Prvním krokem výchozího měření bylo zjistit průměrnou tloušťku všech testovacích vzorků pro následné měření, kdy je vzorek vkládán mezi elektrody. U každého vzorku byla desetkrát změřena tloušťka v různých částech vzorku pomocí mikrometru. Následně byla vypočtena pro každý vzorek průměrná hodnota tloušťky (viz. Tabulka 2.2). U všech vzorků se průměrná tloušťka pohybovala kolem $2 \pm 0,5$ mm.

Tabulka 2.2: Naměřené průměrné tloušťky vzorků

	Sada vzorků	Vzorek č.				
		1	2	3	4	5
Průměrná tloušťka [mm]	1847	1,96	1,91	1,86	1,90	1,92
	1848	1,71	1,82	1,78	1,75	2,49
	1849	1,93	1,93	1,93	1,88	1,89
	1850	1,74	1,77	1,74	1,73	2,81
	1851	1,86	1,80	2,42	2,39	2,49

2.3.2 Nastavení měřicích podmínek na přístroji Novocontrol

Aby bylo možné vyhodnotit případné změny hodnot vzorků po otestování ve sluneční komoře, byly naměřeny výchozí hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele pomocí přístroje Novocontrol, který byl propojen s příslušným programem zaznamenávajícím daná měření WinDETA.

Před samotným měřením dielektrických vlastností vzorků byly nastaveny základní parametry pro daná měření. Po spuštění softwarového programu WinDETA byl nastaven název měření po kliknutí na ikonu [File], následně z nabídky vybrána možnost [Set file names] a poté [Measurement Result], kdy po zadání daného názvu a potvrzení názvu ikonou [SET] byl vytvořen daný soubor, kam se nahrály výsledky určitého měření. Následně mohly být nastaveny základní požadavky měření po vybrání možnosti [Measurement] v hlavní nabídce a zvolení možnosti [Sample specification]. V této nabídce byly následně vyplněny kolonky pro název vzorku, průměr elektrody (20 mm), tloušťku vzorku, kapacity spaceru (1,5 pF) a potvrzeno měření pro dielektrický vzorek. Geometrická kapacita v této tabulce byla dopočítána automaticky ze zadaných veličin. Z nabídky [Measurement] byla poté vybrána možnost [Start conditions], kde se v dané tabulce zadalo napětí (1 V), při kterém měření probíhalo, a to se následně potvrdilo po označení [Use] v daném okně.

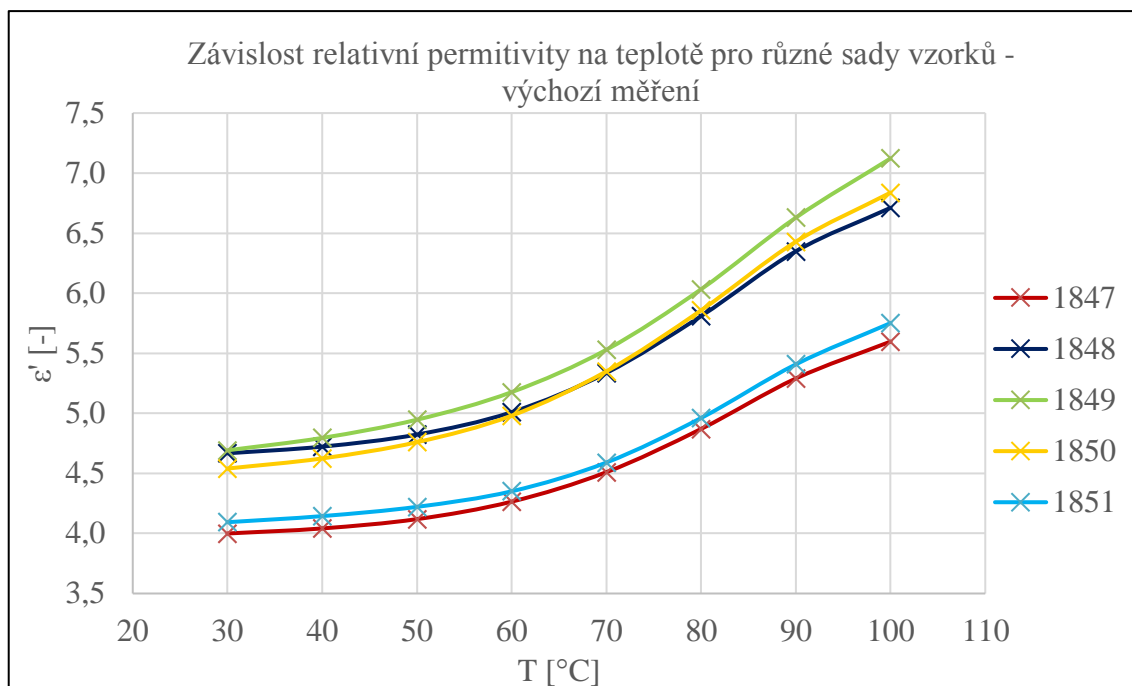
Posléze byla ze stejné nabídky vybrána možnost [List Order], kde lze vybrat veličiny, které mají být při měření zaznamenávány, kdy v tomto případě byly pomocí tlačítka [Add] vybrány frekvence a teplota. Pro tyto veličiny pak byly v nabídce [Value List → Temperature/Frequency] nastaveny měřicí hodnoty, kdy pro teplotu byly nastaveny hodnoty od 30 po 100 °C s krokem 10 °C. Pro frekvenci bylo zvoleno logaritmické měření a po stisknutí ikony [Points] nastavena počáteční a koncová hodnota (10 Hz – 1 MHz) a nastaven [Factor] 1.27, který určoval počet kroků měření. Po těchto hlavních nastaveních všech základních parametrů bylo měření spuštěno.

2.3.3 Výsledné hodnoty výchozího měření

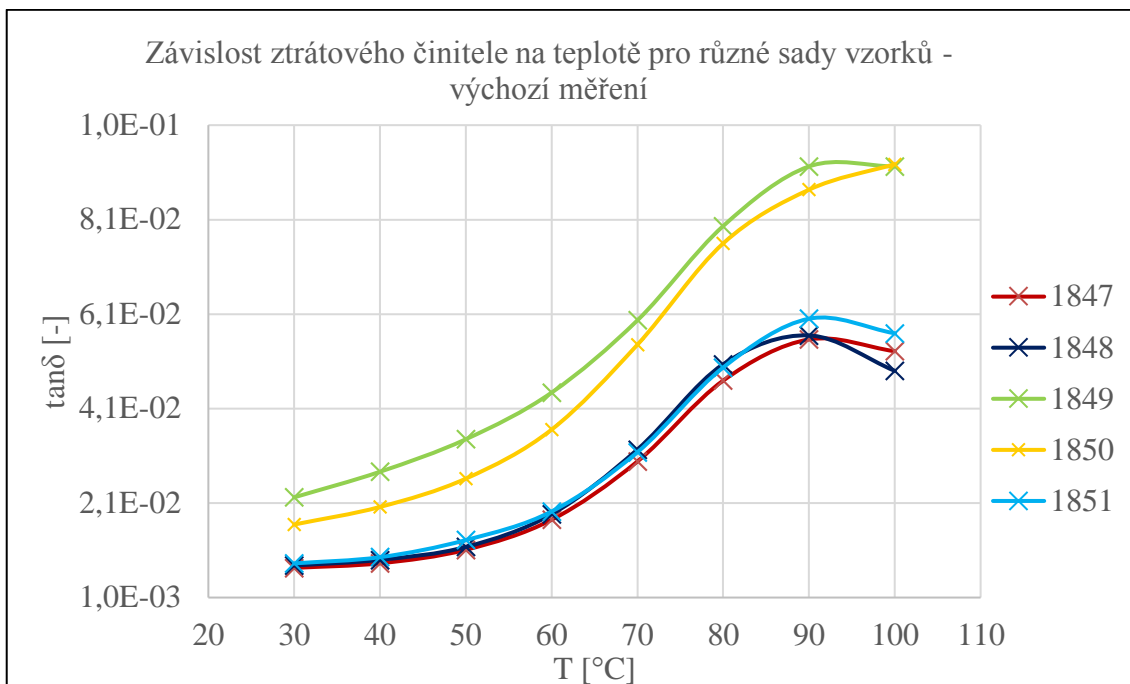
Z výchozích hodnot měření, které byly odečteny na kmitočtu 50 kHz je patrné, že nejvyšší relativní permitivity dosahují vzorky sady 1849 (4,7 – 7,1), zatímco vzorky 1847 (4,0 – 5,6) dosahují hodnoty nejnižší. Tyto rozdíly hodnot relativní permitivity u jednotlivých sad vzorků jsou dány poměrným zastoupením různých aditiv v jednotlivých sadách.

Co se týče ztrátového činitele, jeho hodnoty se pohybovaly v řádech 10^{-3} až 10^{-1} . Pro sady 1850 a 1849 se hodnoty ztrátového činitele pohybovaly o něco výše než u ostatních sad, tedy řádově v intervalu od 10^{-2} až 10^{-1} . Tyto sady obsahují značný podíl hydroxidu hlinitého, který mohl být jedním z důvodů proč u těchto sad jsou hodnoty ztrátového činitele vyšší než u ostatních sad vzorků. Ztrátový činitel u zbylých sad se pohyboval řádově od 10^{-3} po 10^{-2} .

U obou veličin, jak relativní permitivity, tak i ztrátového činitele bylo možné pozorovat jejich závislost na teplotě, kdy spolu se vzrůstající teplotou narůstaly i hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele.



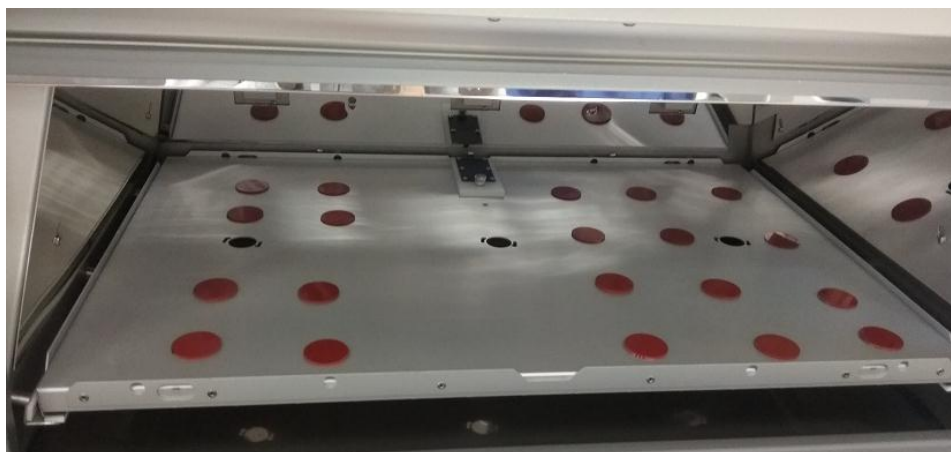
Obr. 2.7: Výchozí měření – Závislost relativní permitivity na teplotě pro vybrané sady vzorků



Obr. 2.8: Výchozí měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě pro vybrané sady vzorků

2.4 Testování vzorků ve sluneční komoře

Poté co byly naměřeny výchozí hodnoty, bylo možno vzorky umístit do sluneční komory. Pro toto testování bylo vybráno celkem 20 vzorků (z každé sady 4). Vzorky byly do komory uspořádány podle daných sad tak, aby nezakrývaly černé těleso (uložené uprostřed v zadní části výsuvné podložky) a navzájem se nedotýkaly. Posléze byla komora uzavřena a mohly být nastaveny základní parametry měření dle normy ČSN EN ISO 4892-2 pro sluneční komory využívající xenonové lampy.



Obr. 2.9: Uložení testovacích vzorků na podložku ve sluneční komoře

2.4.1 Nastavení základních parametrů měření

Po uložení vzorků do testovací komory byly následně nastaveny základní parametry pro měření dle dané normy. Pro tento experiment byla zvolena varianta bez ostříku vodou, tedy pouze nepřetržitě působení simulovaného slunečního záření v kombinaci s fází tmy. Tyto cykly se nepřetržitě opakovaly až do ukončení experimentu.

Nejdříve byl na komoře nastaven nový program pro tento experiment. Po zmáčknutí tlačítka [PROGRAM] byl umožněn přístup do hlavní nabídky a po vybrání možnosti P3 – CREATE, MODIFY OR DELETE CYCLE pomocí šipek a potvrzením stisknutím možnosti [ENTER] bylo možno nastavit vlastní program s libovolnými požadavky. Následně byl program opět za pomoci šipek pojmenován a název potvrzen tlačítkem [ENTER]. Nyní bylo možno nastavit jednotlivé kroky cyklu, na výběr byly možnosti pouze samostatného osvětlení nebo tmy, případně kombinace těchto možností spolu s ostříkem. Pro tento experiment byl jako první krok nastaven osvětlení, druhý krok tma a třetím krokem GO TO STEP 1 se zajistilo pravidelné opakování těchto kroků. Pomocí šipek (←; →) bylo možno u daného kroku nastavit související parametry. Hodnota vlhkosti uvnitř komory byla nastavena na (---) a během měření se pohybovala v hodnotách od 5 do 25 %. Intenzita záření pak byla nastavena dle normy na 60 W/m^2 a teplota černého panelu na $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota vzduchu v komoře pak měla hodnotu $38 \text{ }^\circ\text{C}$. Posledním bodem v této části pak bylo nastavení trvání jednotlivých kroků. V případě osvětlení byla doba trvání kroku 10 hodin, u tmy to pak byly 3 hodiny.

Po zadání všech parametrů a kroků byl cyklus potvrzen a automaticky se spustil, což bylo potvrzeno rozsvícením zeleného signalizačního světýlka u tlačítka [RUN].

V neposlední řadě bylo nutné nastavit i délku celkového trvání testu, kdy po opětovném najetí do hlavní nabídky byla zvolena možnost P1 – SET TEST DURATION a šipkami nastavena daná hodnota. V tomto případě test trval 1030 hodin.

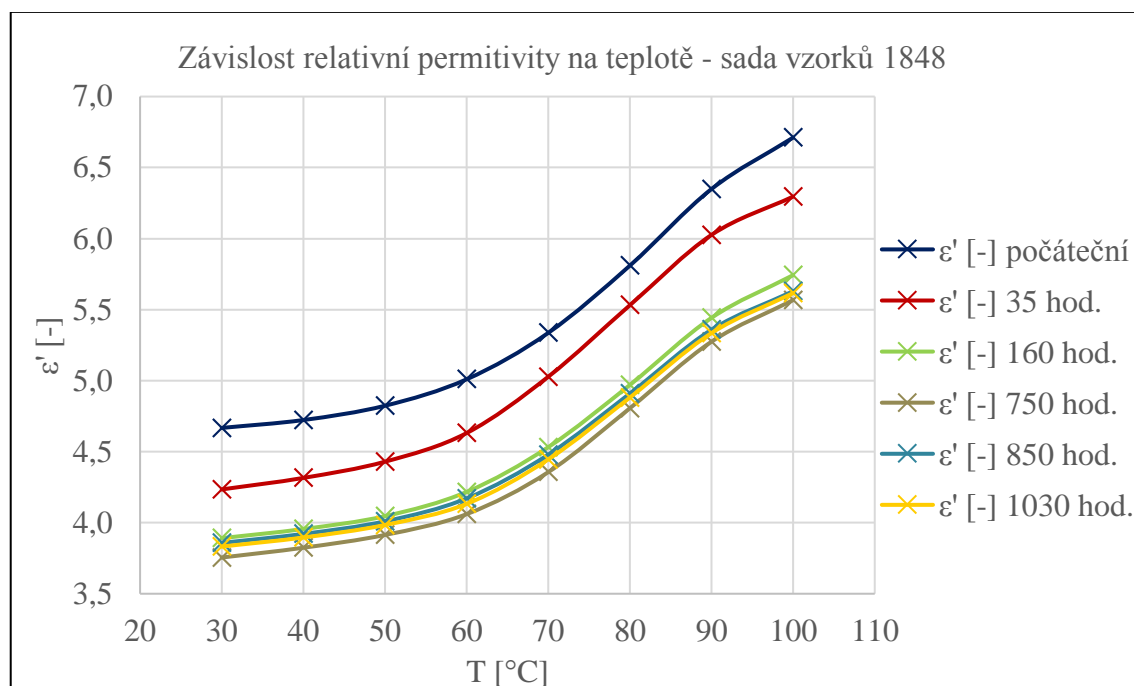
2.4.2 Naměřené hodnoty po otestování vzorků ve sluneční komoře

Pro průběžné testování během trvání experimentu byla vybrána sada vzorků 1848, u které byly postupně změřeny hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele po uplynutí 35, 160, 750, 850 a 1030 hodin. Tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafických závislostí znázorňující vývoj těchto sledovaných veličin s časem trvání experimentu v závislosti na teplotě.

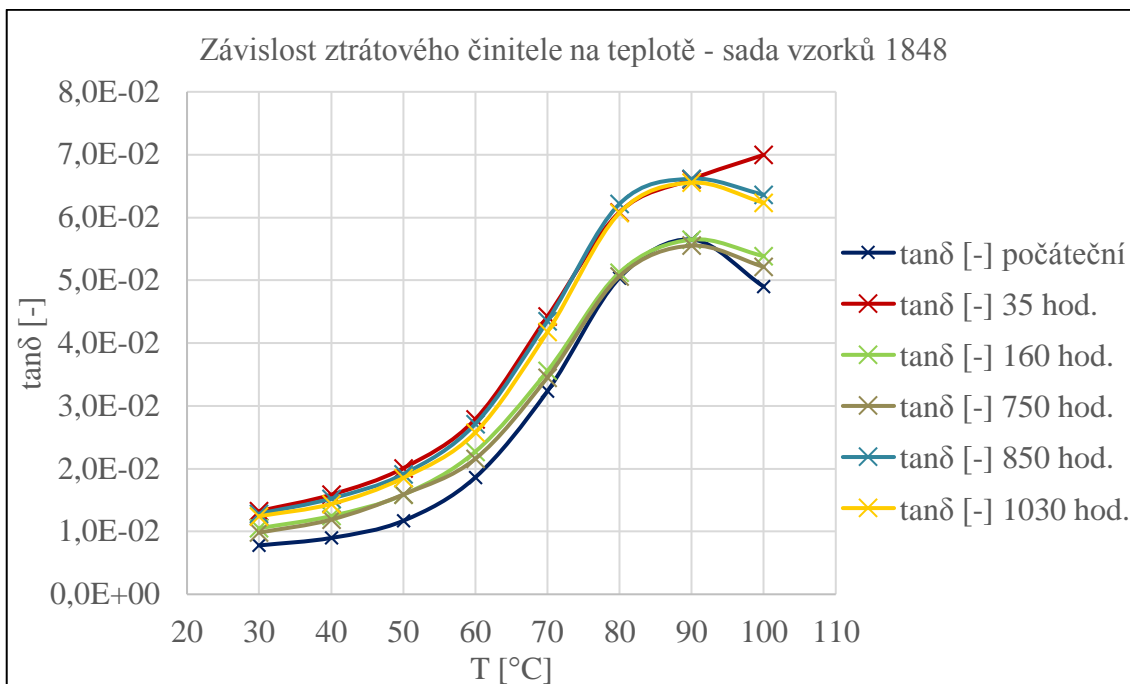
Jak bylo zmíněno v teoretické části, tak relativní permitivita i ztrátový činitel jsou teplotně závislé, což bylo patrné i z naměřených charakteristik. Kdy s narůstající teplotou rostly i hodnoty ztrátového činitele a relativní permitivity.

Z naměřených hodnot sady 1848 je patrné, že se relativní permitivita s délkou trvání testu postupně snižuje až do uplynutí 750 hodin, a to z intervalu (4,7 – 6,7) na interval (3,8 – 5,6). Následně však dochází k navýšení hodnot relativní permitivity přibližně o 0,1. Toto navýšení mohlo být způsobeno změnou vnitřní struktury materiálu vlivem snižování obsahu změkčovadla v kompozitu, čímž došlo k navýšení teploty skelného přechodu T_g a materiál se tím stal křehčím (viz. Obr. 2.10).

V případě ztrátového činitele bylo možno pozorovat, že při nižších teplotách se ztrátový činitel téměř nezměnil, zatímco při vyšších teplotách bylo možné pozorovat kolísání hodnot ztrátového činitele. Hodnoty ztrátového činitele zůstaly v řádech 10^{-2} , tedy lze konstatovat, že si vzorky i přes dlouhodobé působení slunečního záření zachovaly malé dielektrické ztráty. (viz. Obr. 2.11).



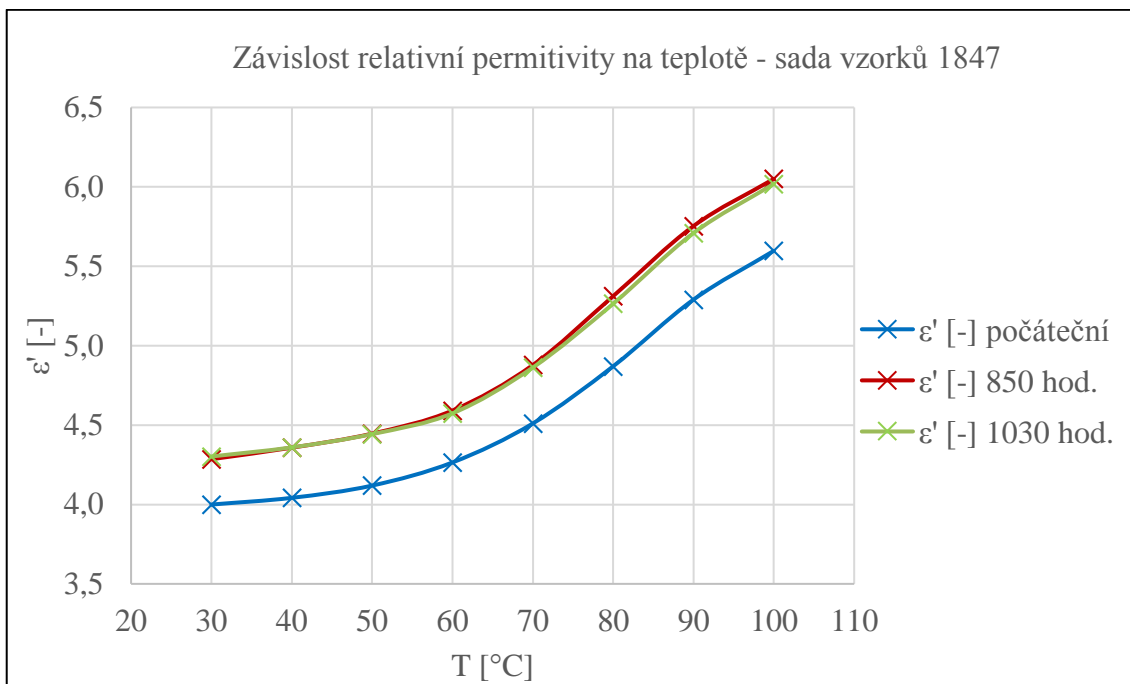
Obr. 2.10: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1848



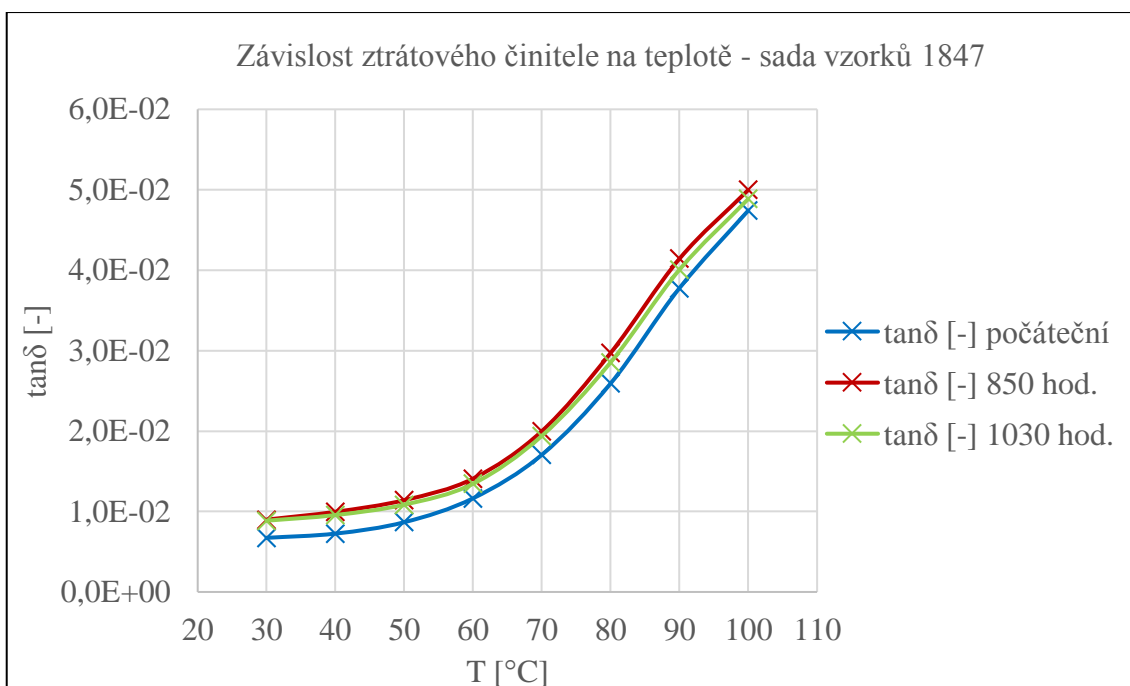
Obr. 2.11: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1848

U dalších sad vzorků byly porovnávány výchozí naměřené hodnoty s hodnotami naměřenými po 850 a 1030 hodinách trvání testu. V případě sady vzorků 1847, kde aditivem byla složka Silbondu bylo možno pozorovat, že oproti počátečním hodnotám relativní permitivity došlo po uplynutí 1030 hodin k výraznému navýšení z počátečního intervalu (4,0 – 5,6) na hodnoty (4,3 – 6,0) (viz. Obr. 2.12). K tomuto navýšení mohla přispět degradace zapříčiňující změnu vnitřní struktury materiálu.

U ztrátového činitele stejně jako u relativní permitivity došlo k mírnému navýšení, ale i přesto hodnoty zůstaly v řádu 10^{-2} , tedy nedošlo k žádnému výraznému zhoršení vlastností týkajících se dielektrických ztrát (viz. Obr 2.13).

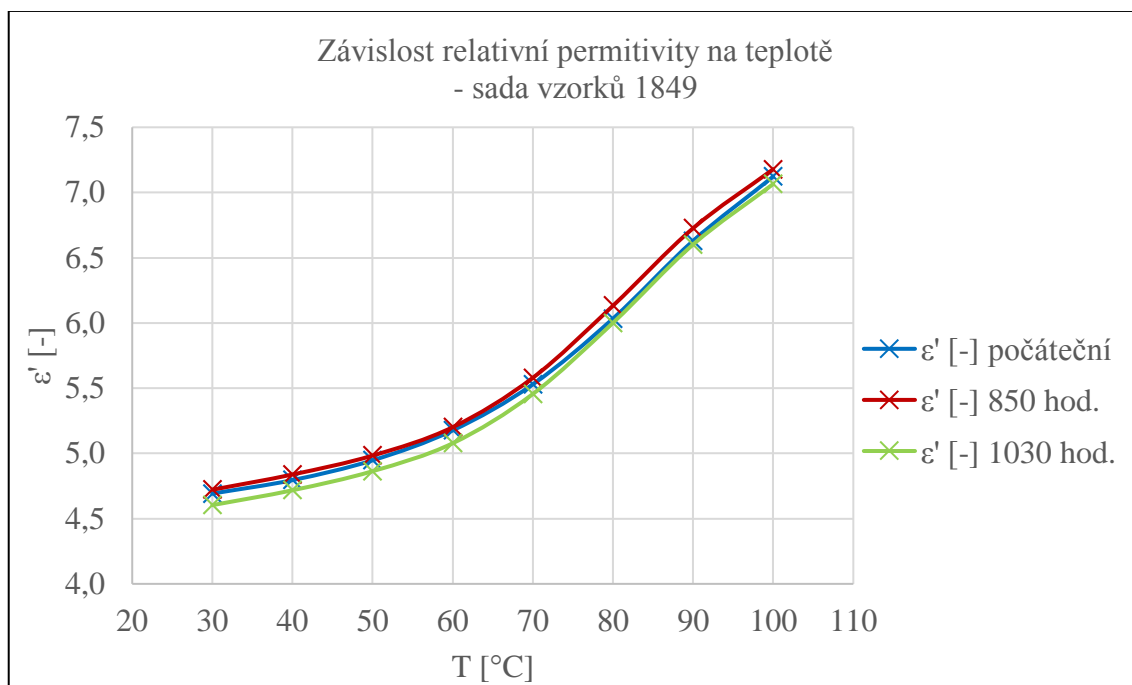


Obr. 2.12: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1847

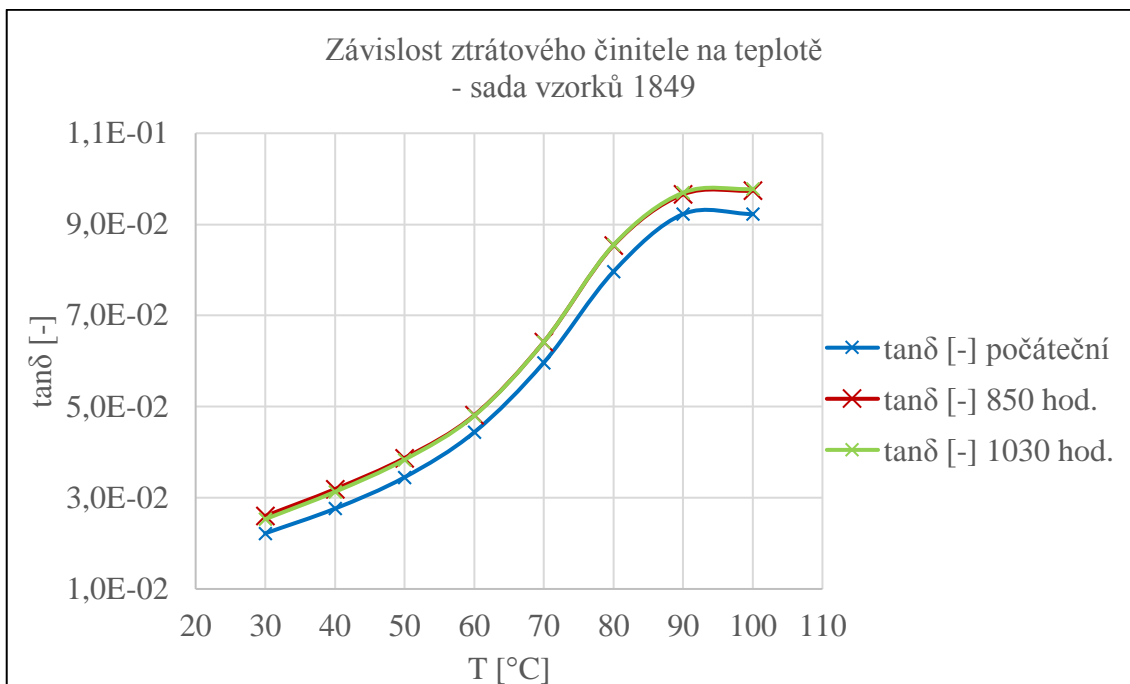


Obr. 2.13: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1847

Stejně jako u sady 1847, tak i u sady 1849 s příměsí ST6 a Apyralu došlo k mírnému kolísání relativní permitivity, avšak o méně než 0,1 oproti výchozí hodnotě, tedy lze tvrdit, že se hodnoty permitivity i po 1030 hodinách téměř nezměnily a materiál si zachoval své počáteční vlastnosti (viz. Obr. 2.14). Stejně jako u relativní permitivity tak i u ztrátového činitele nedošlo k žádným výrazným změnám oproti výchozímu měření.



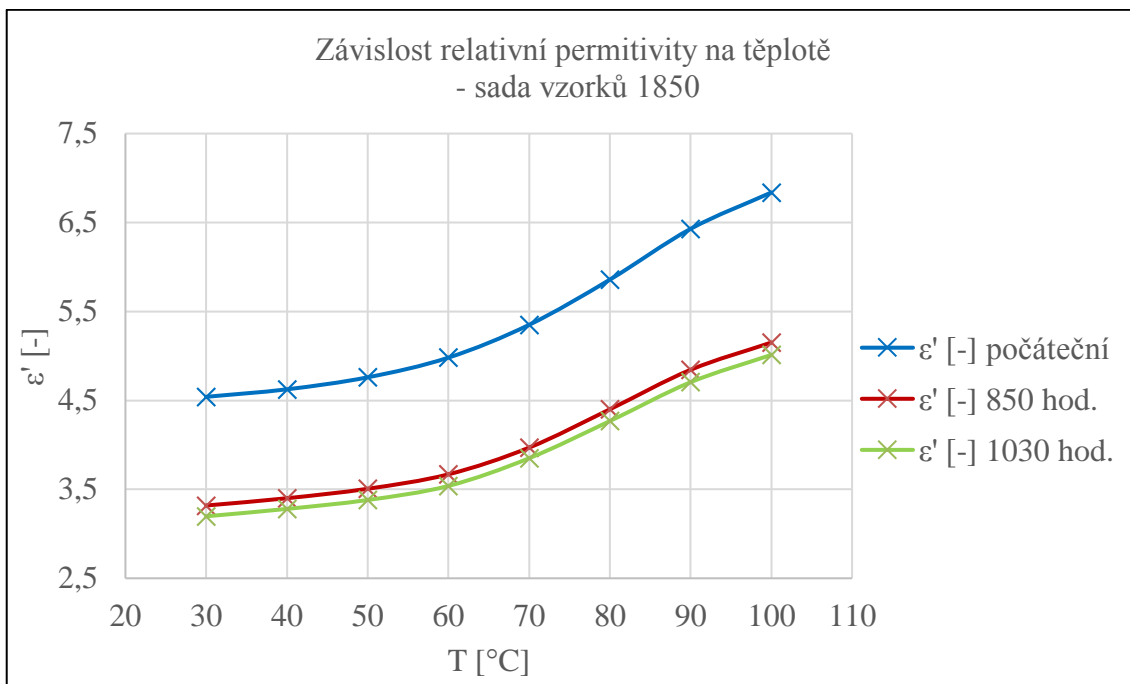
Obr. 2.14: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1849



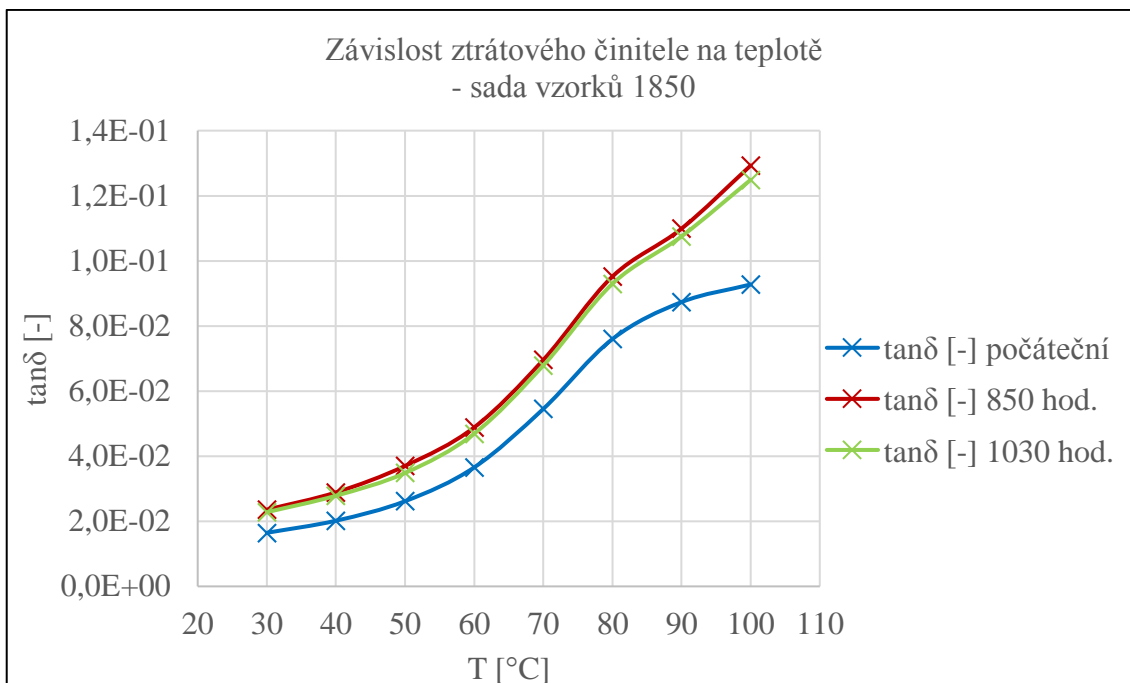
Obr. 2.15: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1849

Zatímco u přechozí sady 1849 nedošlo k žádným výrazným změnám ztrátového činitele a relativní permitivity, případně jen k mírnému navýšení, tak u sady vzorků 1850 kdy aditivem byla směs Silbondu a Hydrafilu došlo k výrazným změnám především v případě relativní permitivity. Z výchozích hodnot v intervalu (4,5 – 6,8) došlo k výraznému poklesu relativní permitivity až na interval (3,2 – 5,0).

I v případě ztrátového činitele došlo ke změnám. Došlo k mírnému navýšení, průměrně o 0,008. V případě nízkých teplot se ztrátový činitel pohyboval v řádu 10^{-2} , ale u vyšších teplot došlo k nárůstu jeho hodnot, které byly řádově 10^{-1} . Tyto změny u obou sledovaných hodnot stejně jako u ostatních vzorků mohly být ovlivněny změnami v materiálu vlivem degradace působícím slunečním zářením.

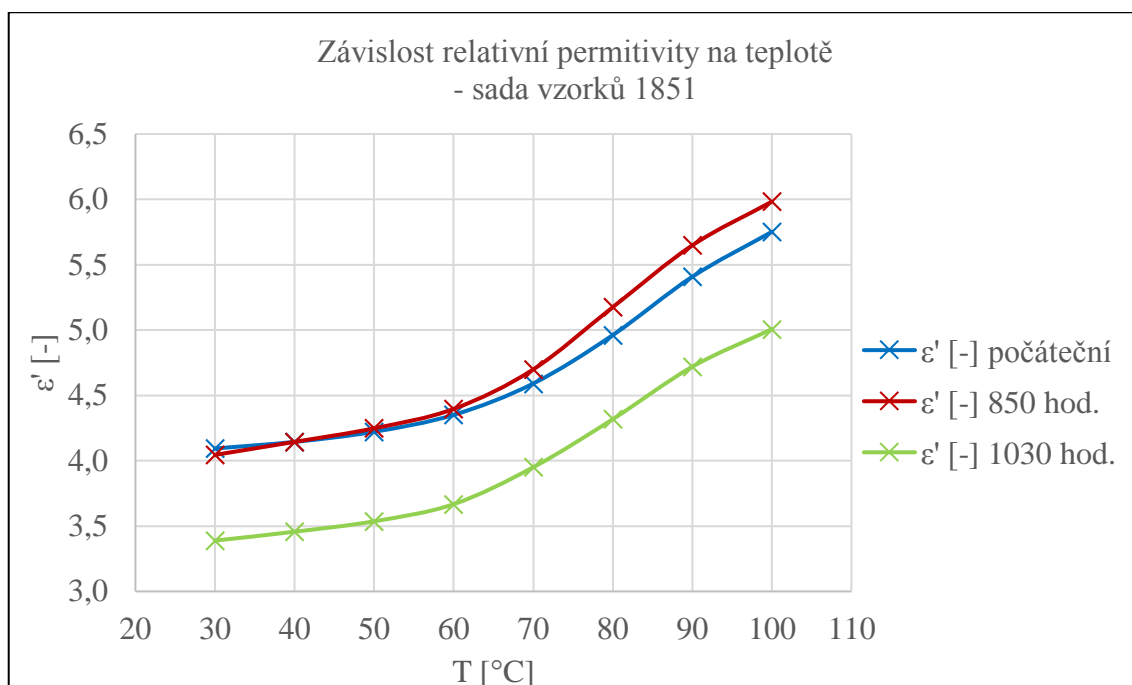


Obr. 2.16: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1850

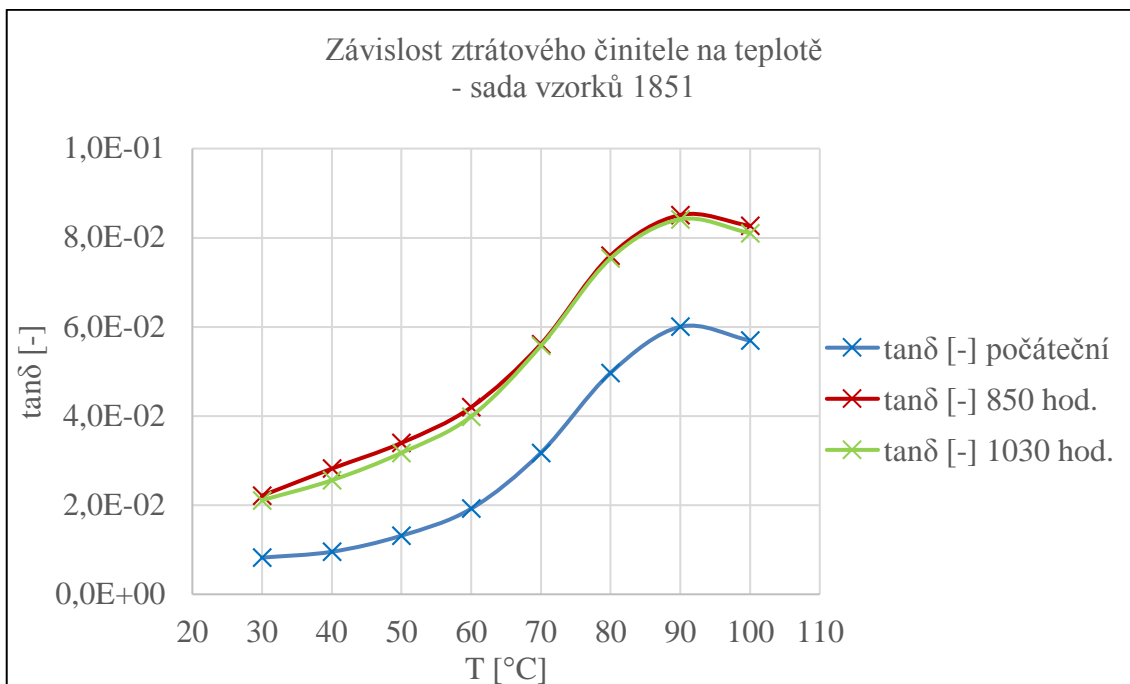


Obr. 2.17: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1850

U sady 1851 s podílem ST6 bylo možno pozorovat pokles relativní permitivity, a to především až po uplynutí 850 hodin. V případě měření po 850 hodinách trvání testu téměř nedošlo k žádným výraznějším změnám, avšak při následném měření po uplynutí 1030 hodin již lze pozorovat pokles permitivity z intervalu (4,1 – 5,8) na interval (3,4 – 5,0). Zatímco u relativní permitivity došlo k výraznější změně až při měření po 1030 hodinách, tak v případě ztrátového činitele došlo k jeho navýšení již po 850 hodinách, ale hodnoty se i po navýšení pohybovaly v řádu 10^{-2} , ačkoliv téměř dosahovaly i řádu 10^{-1} (viz. Obr. 2.19).



Obr. 2.18: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1851



Obr. 2.19: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1851

3. Vyhodnocení experimentu

Tato část diplomové práce je věnována celkovému vyhodnocení navrženého experimentu degradace epoxidových pryskyřic s různými aditivy, které byly vystaveny po určitou dobu účinkům simulovaného slunečního záření ve sluneční komoře, kdy u těchto vzorků byly sledované především dvě základní elektrické veličiny jakožto relativní permitivita a ztrátový činitel. Vyhodnocované hodnoty obou sledovaných veličin byly odečítány při frekvenci 53 Hz.

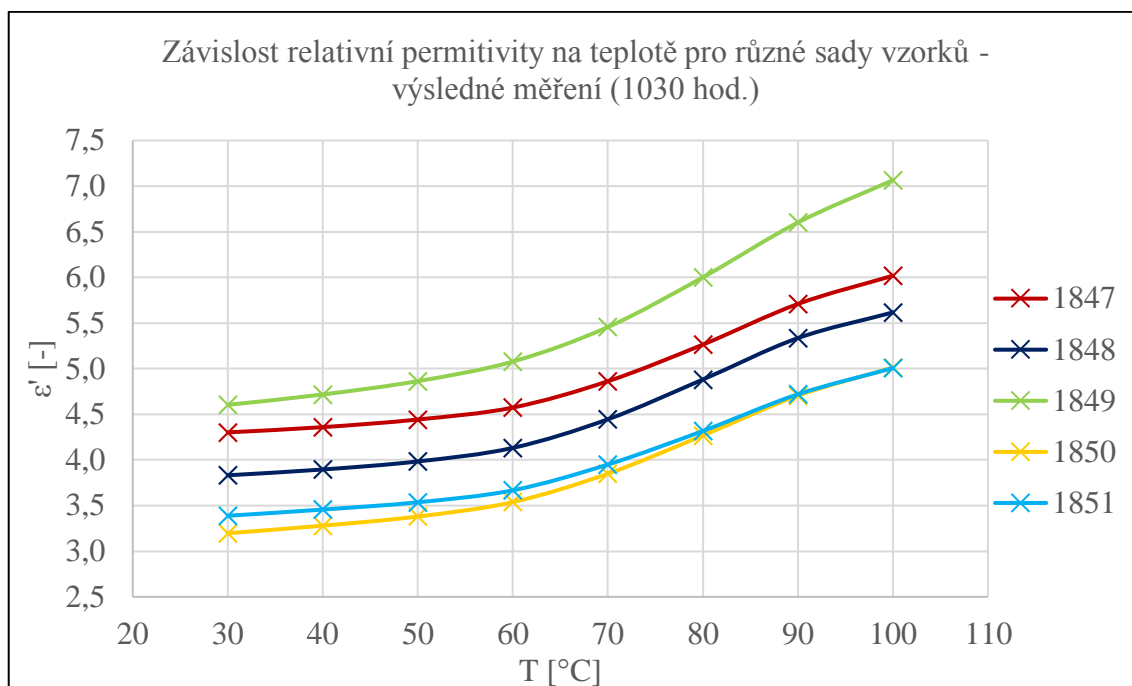
3.1 Porovnání výsledných hodnot s výchozími

V případě relativní permitivity došlo u všech sad vzorků k mírnějším či zásadnějším změnám. Při měření výchozích hodnot relativní permitivity měla nejvyšší hodnotu sada vzorků 1849, zatímco sada 1847 dosahovala hodnot nejnižších ze všech sad. Po porovnání hodnot permitivity při výsledném měření po tom, co vzorky byly vystaveny 1030 hodin simulovanému slunečnímu záření, byl zjištěn pokles hodnot relativní permitivity u všech vzorků, kromě sady vzorků 1847 s aditivem Silbond, kdy došlo k mírnému navýšení permitivity, což mohlo být způsobeno postupným ubýváním změkčovadla v kompozitu, což zapříčinilo navýšení bodu skleného přechodu T_g a tím i mírné navýšení relativní permitivity, ale zároveň i křehnutí materiálu.

Na sadě vzorků 1848, u které byly sledovány průběhy postupně po uplynutí zvolených časů, bylo možno sledovat postupný vliv simulovaného slunečního záření na vzorky. Do 750 hodin testu bylo možno pozorovat postupné snižování průběhů relativní permitivity s délkou trvání testu, zatímco při dalším měření na 850 a 1030 hodinách se tyto hodnoty mírně začaly navyšovat. Tato změna byla nejspíše způsobena změnou ve struktuře materiálu, která mohla být zapříčiněna postupným vnitřním pnutím materiálu a tím rozpadáním řetězců polymeru, případně mohlo dojít k posunu bodu skelného přechodu materiálu vlivem postupného ubývání změkčovadla v materiálu.

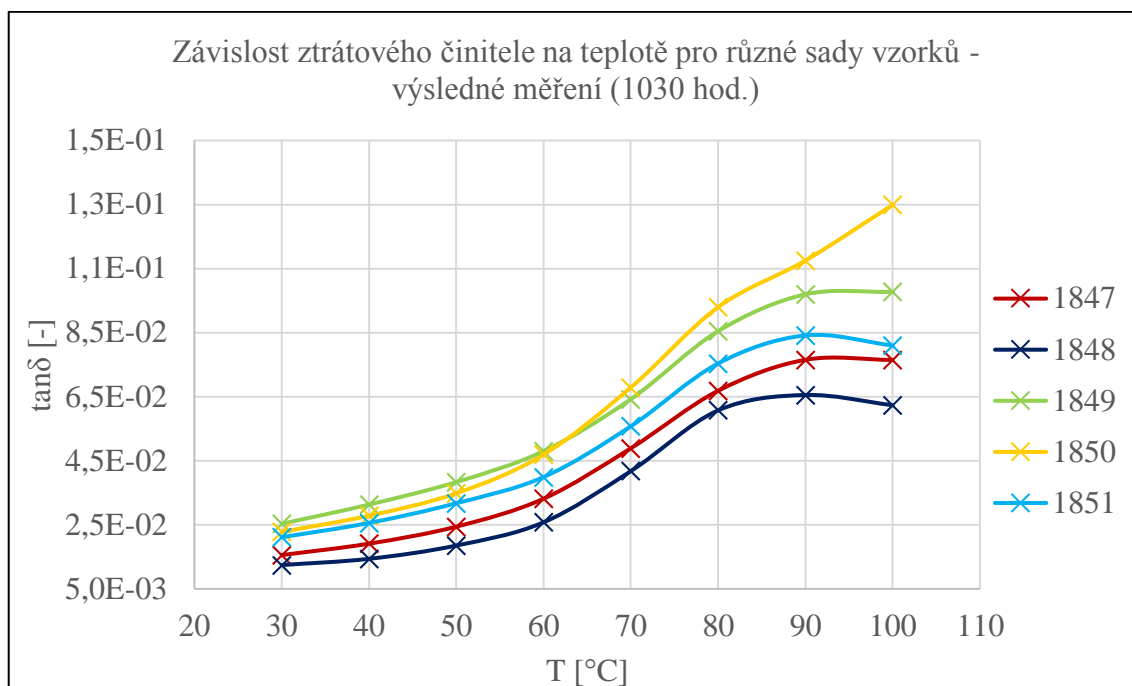
U ostatních sad vzorků se průběhy relativní permitivity v závislosti na teplotě s trvajícím časem experimentu postupně snižovaly. U sad vzorků 1850 a 1851 došlo k poměrně velkému skoku hodnot oproti hodnotám z výchozího měření, avšak u sady 1851 k výraznému snížení došlo až při měření na 1030 hodinách. Při měření této sady po uplynutí 850 hodin byly hodnoty relativní permitivity téměř shodné s výchozími.

Poslední sledovanou sadou vzorků byla sada s aditivy ST6 a Apyral (1849), která si téměř zachovala své počáteční hodnoty, jelikož u této sady došlo k poklesu hodnot relativní permitivity průměrně o 0,1 a lze konstatovat, že tento materiál je poměrně odolný vůči účinkům slunečního záření.



Obr. 3.1: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě pro vybrané sady vzorků

Ztrátový činitel se u některých vzorků po uplynutí 1030 hodin zvýšil, především u sady 1850 u které došlo k průměrnému navýšení o 0,008. U ostatních sad došlo k mírnému navýšení, ale kromě zmíněné sady 1850 zůstaly zbylé sady v řádech od 10^{-3} po 10^{-2} . Tyto změny hodnot mohly být způsobeny degradací materiálu vlivem slunečního záření a případnými změnami ve struktuře materiálu.



Obr. 3.2: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě pro vybrané sady vzorků

V celkovém souhrnu lze vyhodnotit, že nejlépe odolným materiálem vůči degradačním účinkům slunečního záření byl materiál 1849, tedy sada vzorků, u kterých byly v poměrném zastoupení do směsi přimíchány ST6 a Apyral, které si po celou trvání testu více méně zachovaly své počáteční hodnoty.

Naproti tomu se některé sady vzorků ukázaly nepříliš vhodné pro aplikaci ve venkovním prostředí, kde působí sluneční záření. Jsou to především sady 1850 s kombinací aditiv Silbondu a Hydrafilu a 1851, kde je hlavní složkou sklopísek ST6, u kterých došlo k výraznému zhoršení obou sledovaných veličin oproti ostatním sadám vzorků. Nevhodnými se ukázaly i sady 1848 s přídatnou látkou Wollastonitmehl a 1847 s aditivem Silbond, u kterých nejspíše došlo během trvání testu ke změně vnitřní struktury materiálu vlivem degradace slunečním zářením.

Závěr

Tato diplomová práce spočívala v prostudování chemických a fyzikálních základů vlastností dielektrických materiálů se zaměřením na epoxidové pryskyřice. Dále pak v seznámení se s vybranými diagnostickými metodami pro měření vlastností epoxidových pryskyřic s různými plnivými, ovlivněnými slunečním zářením. Tato teoretická část je popsána v několika hlavních podkapitolách této práce. V práci jsou nastíněny základní chemické, mechanické i tepelné vlastnosti samotných epoxidových pryskyřic a následně i vliv různých aditiv na výsledné vlastnosti kompozitu. Další části jsou pak možné degradační procesy, které mohou polymerní materiály ovlivnit během doby života s hlavním zaměřením na vliv prostředí, klimatických činitelů či změn prostředí.

Dále jsou v práci popsány diagnostické metody určené k měření hlavních elektrických veličin elektroizolačních materiálů, kterými jsou relativní permitivita a ztrátový činitel. Jsou zde popsány metody měření na Scheringově můstku, měření za pomoci Q-metru, měření ztrátového činitele rezonanční metodou a měření voltampérovou metodou.

Poslední teoretickou částí je pak popis norem, které byly základem pro experimentální část. Tyto normy se vztahují k měření vlivu simulovaného slunečního záření pro plasty. Jsou zde uvedeny celkem tři normy, z nichž první je zaměřena na všeobecné informace pro měření těchto vlivů a další dvě normy jsou zaměřeny na měření těchto vlivů za použití xenonových a fluorescenčních UV lamp. V těchto normách jsou popsány základní parametry, které je nutno při měření dodržovat, a to především intenzita osvětlení vzorků.

Další část diplomové práce je již věnovaná samotnému experimentu, kde jsou v první řadě popsány přístroje, které byly pro experiment použity, jejich využití i pro jiné aplikace, jejich nastavení a ovládání. Následující kapitola je pak věnována testovacím vzorkům, které byly poskytnuty a technicky upraveny firmou SYNPO. Celkem se jednalo o pět sad vzorků epoxidových pryskyřic, ke kterým během jejich zpracování byly přidány různé druhy mikromletých křemenných písků ovlivňující výsledné vlastnosti jednotlivých sad vzorků (viz tabulka 2.1). U těchto vzorků byly nejprve změřeny a zprůměrovány jejich tloušťky a následně u nich byly změřeny výchozí hodnoty pro testování. Vzorky byly měřeny ve frekvenční oblasti od 10 Hz do 1 MHz, v teplotním rozsahu od 30 do 100 °C s krokem 10 °C. Následně byly pro všechny sady vzorků vyneseny grafické závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele na teplotě, hodnoty byly odečítány při frekvenci 53 Hz.

Po výchozím měření nejvyšší relativní permitivitu vykazovala sada vzorků 1848, zatímco sada 1851 dosahovala hodnot nejnižších. Co se týče ztrátového činitele, tak u všech sad vzorků se pohyboval řádově v intervalu 10^{-3} až 10^{-1} , kdy nejvyšších hodnot dosahovaly sady s hydroxidem hlinitým, jehož přítomnost způsobuje významnou závislost vlastností na absorbované vlhkosti.

Po změření výchozích hodnot byly z každé sady vybrány 4 vzorky, které byly následně uloženy do testovací komory simulující sluneční záření. Na této komoře byly následně nastaveny základní parametry pro měření, kdy dle normy byla nastavena intenzita záření na 60 W/m^2 .

Pro experiment byla zvolena varianta testování bez ostříku, tedy pouze za působení samotného záření, které se střídalo s cyklem tmy. Cyklus ozařování byl nastaven na 10 hodin a cyklus tmy na 3 hodiny a tyto cykly se neustále opakovaly do uplynutí 1030 hodin, kdy byl test ukončen.

Po uplynutí testu byly opětovně u všech sad vzorků změřeny sledované veličiny, tedy relativní permitivita a ztrátový činitel v závislosti na teplotě a následně porovnány výchozí hodnoty s výslednými. U všech vzorků jak při výchozím, tak i výsledném měření bylo možno pozorovat, že jak relativní permitivita, tak i ztrátový činitel spolu s narůstající teplotou měly narůstající trend.

Další část vyhodnocování pak byla zaměřena na změny těchto průběhů u jednotlivých sad v závislosti na trvání testování. Pro průběžné testování byla vybrána sada 1848 s aditivem Wollastonitmehl, u které byly sledovány změny po uplynutí 35, 160, 750, 850 a 1030 hodin. Další sady vzorků pak byly měřeny po uplynutí 850 a 1030 hodin.

U všech sad vzorků bylo možno pozorovat výraznější či mírnější změny obou sledovaných parametrů. Jako nejodolnější sada by se dal označit set vzorků s aditivu ST6 a Apyral (1849), kdy došlo k navýšení relativní permitivity průměrně o 0,1 a v případě ztrátového činitele také pouze k mírnému navýšení. Lze tedy tvrdit, že tato směs je vhodná pro aplikaci do prostor, kde působí účinky slunečního záření.

U ostatních sad pak bylo možno pozorovat degradace způsobené působením vlivů slunečního záření a střídáním teplot. V případě sad 1850 (aditiva Silbond + Hydrafil) a 1851 (aditivum ST6) došlo k výraznému poklesu relativní permitivity, a to průměrně až o 1-1,5 oproti výchozím hodnotám. U ztrátového činitele byl u těchto sad pozorován největší nárůst v porovnání ostatními sadami, a to především u sady 1850 kde došlo k navýšení průměrně o 0,008.

V neposlední řadě jsou tu pak sady 1847 (aditivum Silbond) a 1848 (aditivum Wollastonitmehl), u kterých během trvání testu došlo ke vzrůstu relativní permitivity, i když z průběžného sledování u sady 1848 je patrné, že se permitivita nejdříve snižovala, ale přibližně po uplynutí 850 hodin trvání testu došlo k jejímu vzrůstu. Tento jev mohl být způsoben několika vlivy.

Jednou z hlavních příčin způsobujících takovéto chování materiálu mohl být teplotní šok materiálu, kdy při přechodu z fáze tmy do fáze ozáření došlo k rychlému nárůstu teploty, a tím bylo způsobeno vnitřní pnutí v materiálu, a tedy i ke změně krystalinity polymeru. Jako další vliv zapříčiňující tuto změnu mohl být fakt, že během testu došlo k částečnému nebo úplnému odstranění změkčovadla z polymeru a tím k posunu bodu skleného přechodu na vyšší hodnotu a ke křehnutí materiálu. V neposlední řadě vzorky mohly být ovlivněny relativní vlhkostí uvnitř komory, u které byla snaha dodržet průměrně stejnou vlhkost při každém měření vzorků, ale jelikož se u ostatních sad vzorků neprojevil podobný jev lze usoudit, že vlhkost nebyla hlavním činitelem této změny

Závěrem lze tedy říci, že daná aditiva zásadně ovlivnila chování polymerů při testu, a kromě jedné sady, která prošla testem téměř beze změn relativní permitivity a ztrátového činitele, tak ostatní sady polymerů nejsou příliš vhodné pro použití v prostorách, kde působí sluneční záření, jelikož u nich již v krátkém časovém intervalu došlo k zásadním změnám hlavních elektrických veličin, které jsou důležité u elektroizolačních hmot.

V příloze této práce jsou uvedeny dílčí kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele vyneseny pro teplotu 30 °C. Zbylé závislosti je možné zobrazit pomocí průměrných naměřených hodnot, které jsou tabulkově uvedeny v přílohách na CD, které je součástí této práce.

Seznam použité literatury

- [1] ROZSÍVALOVÁ, Z., KŘIVÁK, P., VANĚK, J. Materiály a technická dokumentace, laboratorní cvičení. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 83 s.
- [2] ElektroPrůmysl.cz: Měření neelektrických veličin, Snímací a regulační technika [online]. 2016, 6(12). Dostupné také z: <http://www.elektroprumysl.cz/casopis/2016/prosinec/index.html>
- [3] EPOXY TECHNOLOGY INC. Glass Transition Temperature for Epoxies [online]. In: Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/tip23.pdf>
- [4] BĚHÁLEK, L. Polymery. Code Creator, s.r.o, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [5] MARTIN, R. 1 - The physical and chemical ageing of polymeric composites. Ageing of Composites. Woodhead Publishing, 2008, s. 3-33. ISBN 9781845693527.
- [6] MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [7] WEISS, V. a E. STŘIHAVKOVÁ. Polymery. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, Fakulta výrobních technologií a managementu., 2014. Skripta., 150 s. ISBN 978-80-7414-738-8.
Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:4120d5d0-ca55-11e5-bef4-005056827e51>
- [8] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127151
- [9] DUCHÁČEK, V. Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006, ISBN 80-7080-617-6
- [10] PROKOPOVÁ, I. Makromolekulární chemie. Vyd. 2. Praha: VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3
- [11] MLEZIVA, Josef. Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1

- [12] MUCHA, J. Diagnostika vlastností elektroizolačních zalévacích hmot. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2014. 70 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [13] HORÁK, L. Analýza elektrických vlastností epoxidových pryskyřic s různorodými plnivý. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2016. 59 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [14] HUB, M. Koaxiální sondy pro měření permitivity materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 46 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.
- [15] Q-LAB. Technical manual LX-5080-TM: Xe-1 and Xe-3 Xenon Test Chambers. 2015.
- [16] NOVOCONTROL TECHNOLOGIES. Novocontrol Quick Manual Concept 80, 50, 40. 2014.

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Náhradní schéma sériového obvodu a jeho vektorový diagram.....	10
Obr. 1.2: Náhradní schéma paralelního obvodu a jeho vektorový diagram	10
Obr. 1.3: Oxiranová (epoxidová) skupina	11
Obr. 1.4: Řetězec vytvrzené epoxidové pryskyřice	12
Obr. 1.5: Závislost modulu pružnosti na teplotě u částečně krystalického polymeru	14
Obr. 1.6: Scheringův můstek – schéma zapojení.....	18
Obr. 1.7: Schéma zapojení Q-metru – základní princip.....	19
Obr. 1.8: Schéma zapojení Q-metru s měřicím přípravkem.....	20
Obr. 1.9: Schéma zapojení pro měření proudu při nabíjení a vybíjení vzorku.....	21
Obr. 2.1: Testovací komora Q-SUN Xe-3	23
Obr. 2.2: Uspořádání uvnitř testovací komory	24
Obr. 2.3: Displej pro nastavení základních podmínek měření.....	24
Obr. 2.4: Displej zobrazující dobu cyklu, testu a celkový čas zkoušky	25
Obr. 2.5: Displej zobrazující vln. délku záření, teplotu černého panelu a relativní vlhkost	25
Obr. 2.6: Uspořádání elektrodevého systému.....	27
Obr. 2.7: Výchozí měření – Závislost relativní permitivity na teplotě pro vybrané sady vzorků	31
Obr. 2.8: Výchozí měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě pro vybrané sady vzorků	32
Obr. 2.9: Uložení testovacích vzorků na podložku ve sluneční komoře	32
Obr. 2.10: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1848	34
Obr. 2.11: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1848	35
Obr. 2.12: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1847	36
Obr. 2.13: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1847	36
Obr. 2.14: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1849	37
Obr. 2.15: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1849	38
Obr. 2.16: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1850	39
Obr. 2.17: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1850	39

Obr. 2.18: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě – sada vzorků 1851	40
Obr. 2.19: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě – sada vzorků 1851	41
Obr. 3.1: Výsledné měření – Závislost relativní permitivity na teplotě pro vybrané sady vzorků	43
Obr. 3.2: Výsledné měření – Závislost ztrátového činitele na teplotě pro vybrané sady vzorků	44

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Popis složení testovacích vzorků	29
Tabulka 2.2: Naměřené průměrné tloušťky vzorků	29

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Název
B	[-]	Součinitel elektroodového systému
c	[mm]	Vzdálenost mezi měřicí a ochrannou elektrodou
C_0	[F]	Geometrická kapacita
C_1	[F]	Pomocný kondenzátor
C_N	[F]	Normálový kondenzátor
C_P	[F]	Paralelně zapojený kondenzátor
C_S	[F]	Sériově zapojený kondenzátor
C_V	[F]	Kapacita zkoumaného vzorku
C_x	[F]	Kapacita elektroodového systému s vloženým vzorkem
D, D_1	[mm]	Průměr měřicích elektrod
E	[Pa]	Konstanta úměrnosti (Youngův modul pružnosti)
f	[Hz]	Kmitočet
h	[mm]	Tloušťka vzorku
I	[A]	Elektrický proud
Q_f	[-]	Napěťový činitel
$R_{1,2}$	[Ω]	Pomocné rezistory
R_P	[Ω]	Paralelně zapojený rezistor
R_S	[Ω]	Sériově zapojený rezistor
R_v	[Ω]	Vnitřní odpor
S_{ef}	[m ²]	Efektivní plocha měřicí elektrody
T	[°C]	Teplota
T_f	[°C]	Teplota tečení
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_m	[°C]	Teplota tání
$\tan\delta$	[-]	Ztrátový činitel
U	[V]	Elektrické napětí
U_b	[V]	Vstupní napětí
U_c	[V]	Rezonanční napětí
ε	[-]	Relativní prodloužení
ε_0	[-]	Permitivita vakua

ε'	[-]	Reálná složka komplexní permitivity, relativní permitivita
ε''	[-]	Imaginární složka komplexní permitivity (ztrátové číslo)
ρ_v	[$\Omega \cdot m$]	Vnitřní rezistivita
σ	[Pa]	Normálové napětí
ω	[s^{-1}]	Úhlový kmitočet

Návrh laboratorní úlohy

Nad rámec zadání této diplomové práce je návrh laboratorní úlohy určené pro předmět Klimatotechnologie, kdy hlavním účelem této úlohy je seznámit studenty s vlivem slunečního záření na materiály a vliv aditiv na výsledné vlastnosti materiálů.

Cíl úlohy

Cílem úlohy je u daných sad polymerů složených z epoxidové pryskyřice a přidružených různých aditiv mikromletých křemenných písků proměřit změny relativní permitivity a ztrátového činitele po vystavení vzorků vlivům simulovaného slunečního záření ve sluneční komoře s xenonovými lampami. Následně po porovnání s výchozími hodnotami vyhodnotit případné změny materiálů a odůvodnit proč k daným změnám došlo.

Zadání úlohy

U předložených degradovaných vzorků změřte výsledné hodnoty permitivity a ztrátového činitele ve frekvenční oblasti od 10 Hz do 1 MHz, v teplotním rozsahu od 40 po 80 °C s krokem po 10 °C. Pro tyto vzorky si poznamenejte hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele před degradací slunečním zářením, se kterými následně budete porovnávat vámi naměřené hodnoty u vzorků po degradaci. Sepište protokol o pozorovaných změnách u jednotlivých sad vzorků a příčinách, které tyto změny mohly způsobit.

Postup měření

1. Z daných sad vzorků, které byly testovány ve sluneční komoře, si ze tří sad vyberte libovolný jeden vzorek.
2. Pro tyto vzorky si uložte hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele těchto vzorků před degradací, se kterými následně budete porovnávat výsledné hodnoty tohoto měření.
3. Změřte u každého vzorku jeho průměrnou tloušťku pomocí mikrometru. U každého vzorku proveďte toto měření alespoň 5x v různých částech vzorku.
4. Opatrně vložte první vzorek do elektrodového systému přístroje Novocontrol a pomocí otočné matky jej v systému zajistěte. Následně vložte sestavu elektrodového systému do měřicího zařízení.
5. Na ploše PC spusťte program WinDETA.
6. V levém horním rohu programu klikněte na ikonu File → Set file names → Measurement Result a zadejte název souboru, pod kterým se mají výsledky uložit. Následně potvrďte stisknutím ikony SET.

7. V hlavní nabídce klikněte na ikonu Measurement → Sample specification a v tomto okně vyplňte kolonky pro název daného vzorku, průměr elektrody (20 mm), tloušťku daného vzorku, kapacity spaceru (1,5 pF) a potvrďte měření pro dielektrický vzorek. Geometrická kapacita se automaticky dopočítá ze zadaných parametrů.
8. Zadejte hlavní podmínky měření. Vyberte z hlavní nabídky Measurement → Start conditions, kde v zobrazeném okně zadejte napětí 1 V a počáteční čas 0 s. Toto nastavení potvrďte stisknutím tlačítka Use. Ze stejné hlavní nabídky pak následně vyberte možnost List Order a vyberte veličiny pro sledování, v tomto případě frekvenci a teplotu, pomocí tlačítka Add.
9. Pro vybrané veličiny nastavte základní parametry měření. Measurement → Value list → Temperature/Frequency. Pro teplotu postupně zadejte hodnoty od 40 po 80 °C s krokem 10 °C. Pro frekvenci zvolte logaritmické měření a po stisknutí ikony Points nastavte počáteční a koncovou hodnotu tedy 10 Hz a 1 MHz. Poté nastavte krok měření (Factor) na hodnotu 1.7 a nastavení potvrďte ikonou Ok.
10. Spusťte měření. Measurement → Start. Poté se zobrazí okno, kde je nutné povolit spuštění heaterů stisknutím ikony Ok.
11. Po ukončení všech měření vygenerujte výsledky měření do textového souboru. File → Save Measurement As/Export result → ASCII.
12. Toto měření opakujte pro všechny vybrané vzorky.

Vyhodnocení – protokol

Vyneste grafické závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele na teplotě pro vzorky před degradací slunečním zářením a do stejných grafů vyneste vámi naměřené hodnoty. Hodnoty teploty uvádějte v °C. Následně porovnejte tyto průběhy, proveďte rozbor případných změn a uveďte možné příčiny, které tyto změny mohly způsobit.

Seznam příloh

A Naměřené průměrné hodnoty sad vzorků

A. 1	Sada vzorků 1848 ($f = 53$ Hz)	58
A. 2	Sada vzorků 1847 ($f = 53$ Hz)	61
A. 3	Sada vzorků 1849 ($f = 53$ Hz)	63
A. 4	Sada vzorků 1850 ($f = 53$ Hz)	65
A. 5	Sada vzorků 1851 ($f = 53$ Hz)	67

B Grafické závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele na frekvenci

B. 1	Sada vzorků 1848 ($T=30$ °C)	69
B. 2	Sada vzorků 1847 ($T=30$ °C)	70
B. 3	Sada vzorků 1849 ($T=30$ °C)	71
B. 4	Sada vzorků 1850 ($T=30$ °C)	72
B. 5	Sada vzorků 1851 ($T=30$ °C)	73

A Naměřené průměrné hodnoty sad vzorků

A. 1 Sada vzorků 1848 ($f = 53$ Hz)

Tab. 1: Počáteční průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz

Počáteční měření		
T [°C]	ϵ' [-] počáteční	tan δ [-] počáteční
30	4,667	7,8E-03
40	4,723	9,0E-03
50	4,823	1,2E-02
60	5,010	1,9E-02
70	5,336	3,2E-02
80	5,810	5,0E-02
90	6,349	5,6E-02
100	6,711	4,9E-02

Tab. 2: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 35 hodin

Po 35 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 35 hod.	tan δ [-] 35 hod.
30	4,234	1,3E-02
40	4,315	1,6E-02
50	4,429	2,0E-02
60	4,631	2,8E-02
70	5,027	4,4E-02
80	5,531	6,1E-02
90	6,026	6,6E-02
100	6,296	7,0E-02

Tab. 3: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 160 hodin

Po 160 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 160 hod.	$\tan\delta$ [-] 160 hod.
30	3,891	1,1E-02
40	3,956	1,3E-02
50	4,046	1,6E-02
60	4,217	2,3E-02
70	4,532	3,6E-02
80	4,970	5,1E-02
90	5,442	5,7E-02
100	5,743	5,4E-02

Tab. 4: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 750 hodin

Po 750 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 750 hod.	$\tan\delta$ [-] 750 hod.
30	3,755	9,8E-03
40	3,824	1,2E-02
50	3,914	1,6E-02
60	4,060	2,2E-02
70	4,356	3,5E-02
80	4,806	5,1E-02
90	5,274	5,6E-02
100	5,567	5,2E-02

Tab. 5: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 850 hodin

Po 850 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 850 hod.	$\tan\delta$ [-] 850 hod.
30	3,858	1,3E-02
40	3,921	1,5E-02
50	4,010	1,9E-02
60	4,171	2,2E-02
70	4,479	4,4E-02
80	4,910	6,2E-02
90	5,359	6,6E-02
100	5,629	6,4E-02

Tab. 6: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 1030 hodin

Po 1030 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 1030 hod.	$\tan\delta$ [-] 1030 hod.
30	3,832	1,2E-02
40	3,896	1,4E-02
50	3,984	1,9E-02
60	4,132	2,6E-02
70	4,446	4,2E-02
80	4,881	6,1E-02
90	5,335	6,6E-02
100	5,616	6,2E-02

A. 2 Sada vzorků 1847 ($f = 53$ Hz)

Tab. 7: Počáteční průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz

Počáteční měření		
T [°C]	ϵ' [-] počáteční	$\tan\delta$ [-] počáteční
30	3,999	7,3E-03
40	4,042	8,3E-03
50	4,119	1,1E-02
60	4,265	1,7E-02
70	4,510	3,0E-02
80	4,870	4,7E-02
90	5,290	5,6E-02
100	5,597	5,3E-02

Tab. 8: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 850 hodin

Po 850 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 850 hod.	$\tan\delta$ [-] 850 hod.
30	4,285	1,7E-02
40	4,358	2,3E-02
50	4,446	2,8E-02
60	4,592	3,6E-02
70	4,878	5,1E-02
80	5,312	7,1E-02
90	5,753	8,0E-02
100	6,050	8,0E-02

Tab. 9: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 1030 hodin

Po 1030 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 1030 hod.	$\tan\delta$ [-] 1030 hod.
30	4,302	1,6E-02
40	4,360	1,9E-02
50	4,443	2,4E-02
60	4,574	3,3E-02
70	4,862	4,9E-02
80	5,264	6,7E-02
90	5,709	7,7E-02
100	6,019	7,7E-02

A. 3 Sada vzorků 1849 ($f = 53 \text{ Hz}$)

Tab. 10: Počáteční průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz

Počáteční měření		
T [°C]	ϵ' [-] počáteční	$\tan\delta$ [-] počáteční
30	4,692	2,2E-02
40	4,795	2,8E-02
50	4,947	3,5E-02
60	5,177	4,4E-02
70	5,529	6,0E-02
80	6,033	8,0E-02
90	6,629	9,2E-02
100	7,122	9,2E-02

Tab. 11: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 850 hodin

Po 850 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 850 hod.	$\tan\delta$ [-] 850 hod.
30	4,722	2,6E-02
40	4,838	3,2E-02
50	4,983	3,9E-02
60	5,201	4,8E-02
70	5,580	6,4E-02
80	6,132	8,5E-02
90	6,726	9,7E-02
100	7,178	9,7E-02

Tab. 12: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 1030 hodin

Po 1030 hodinách		
T [°C]	ε' [-] 1030 hod.	$\tan\delta$ [-] 1030 hod.
30	4,604	2,5E-02
40	4,718	3,1E-02
50	4,864	3,8E-02
60	5,078	4,8E-02
70	5,456	6,4E-02
80	6,001	8,6E-02
90	6,602	9,7E-02
100	7,065	9,8E-02

A. 4 Sada vzorků 1850 ($f = 53 \text{ Hz}$)

Tab. 13: Počáteční průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz

Počáteční měření		
T [°C]	ϵ' [-] počáteční	$\tan\delta$ [-] počáteční
30	4,540	1,6E-02
40	4,625	2,0E-02
50	4,760	2,6E-02
60	4,981	3,7E-02
70	5,350	5,5E-02
80	5,858	7,6E-02
90	6,429	8,7E-02
100	6,838	9,3E-02

Tab. 14: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 850 hodin

Po 850 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 850 hod.	$\tan\delta$ [-] 850 hod.
30	3,318	2,4E-02
40	3,400	2,9E-02
50	3,507	3,7E-02
60	3,669	4,9E-02
70	3,969	7,0E-02
80	4,400	9,5E-02
90	4,844	1,1E-01
100	5,151	1,3E-01

Tab. 15: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 1030 hodin

Po 1030 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 1030 hod.	$\tan\delta$ [-] 1030 hod.
30	3,197	2,3E-02
40	3,280	2,8E-02
50	3,381	3,5E-02
60	3,538	4,7E-02
70	3,850	6,8E-02
80	4,268	9,3E-02
90	4,704	1,1E-01
100	5,012	1,3E-01

A. 5 Sada vzorků 1851 ($f = 53 \text{ Hz}$)

Tab. 16: Počáteční průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz

Počáteční měření		
T [°C]	ϵ' [-] počáteční	$\tan\delta$ [-] počáteční
30	4,094	8,2E-03
40	4,144	9,5E-03
50	4,221	1,3E-02
60	4,351	1,9E-02
70	4,590	3,2E-02
80	4,961	5,0E-02
90	5,408	6,0E-02
100	5,751	5,7E-02

Tab. 17: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 850 hodin

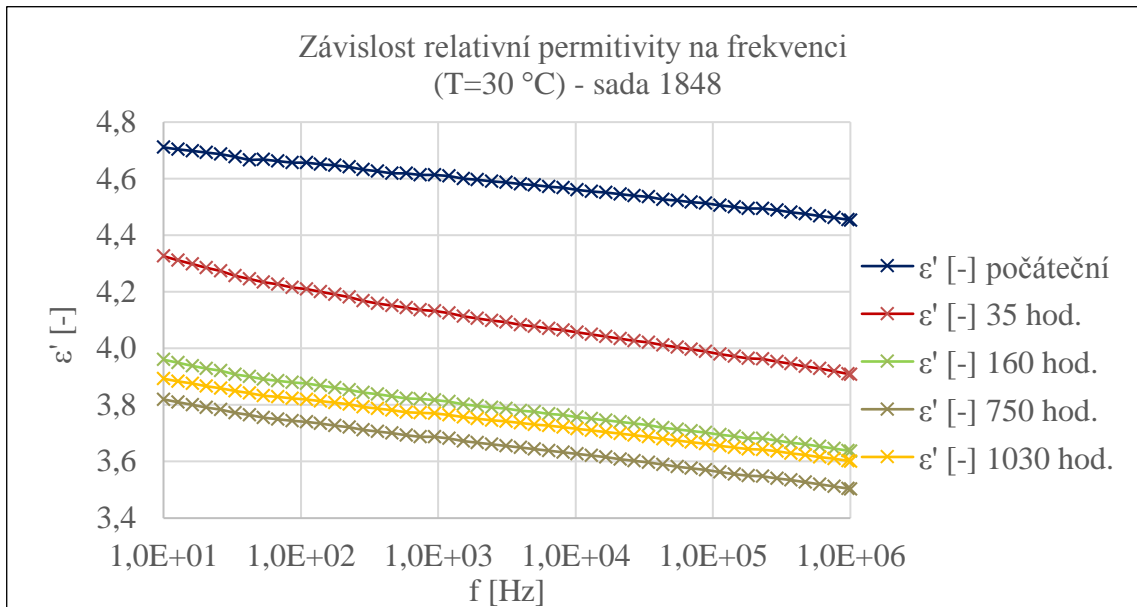
Po 850 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 850 hod.	$\tan\delta$ [-] 850 hod.
30	4,045	2,2E-02
40	4,144	2,8E-02
50	4,248	3,4E-02
60	4,396	4,2E-02
70	4,699	5,6E-02
80	5,175	7,6E-02
90	5,648	8,5E-02
100	5,983	8,3E-02

Tab. 18: Průměrné hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele při různých teplotách pro frekvenci 53 Hz po uplynutí 1030 hodin

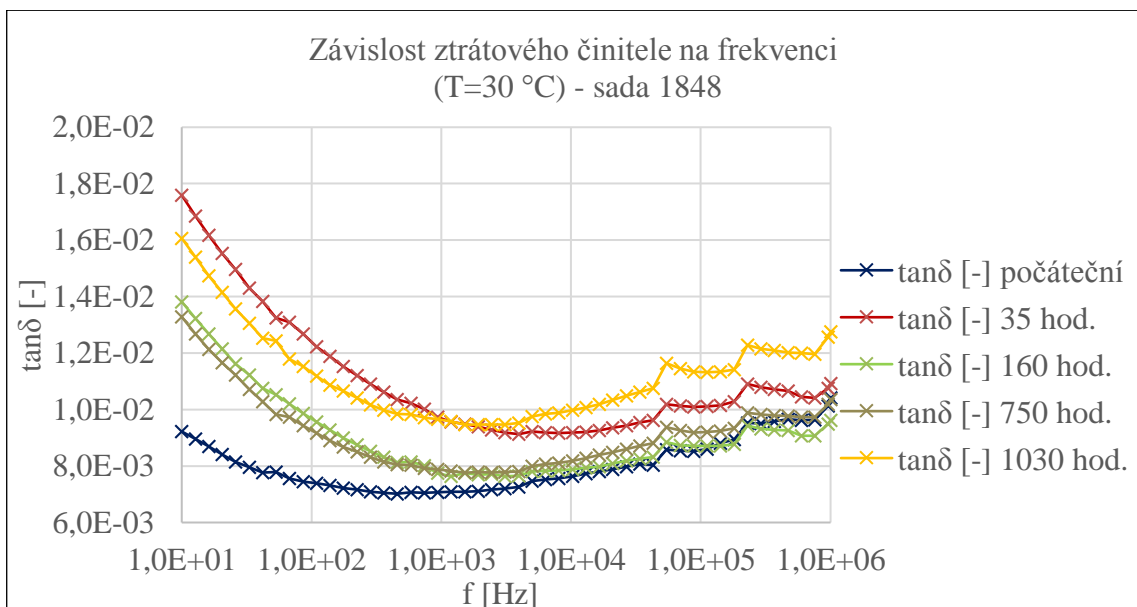
Po 1030 hodinách		
T [°C]	ϵ' [-] 1030 hod.	$\tan\delta$ [-] 1030 hod.
30	3,389	2,1E-02
40	3,457	2,6E-02
50	3,536	3,2E-02
60	3,668	4,0E-02
70	3,950	5,6E-02
80	4,318	7,5E-02
90	4,719	8,4E-02
100	5,007	8,1E-02

B Grafické závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele na frekvenci

B.1 Sada vzorků 1848 (T=30 °C)

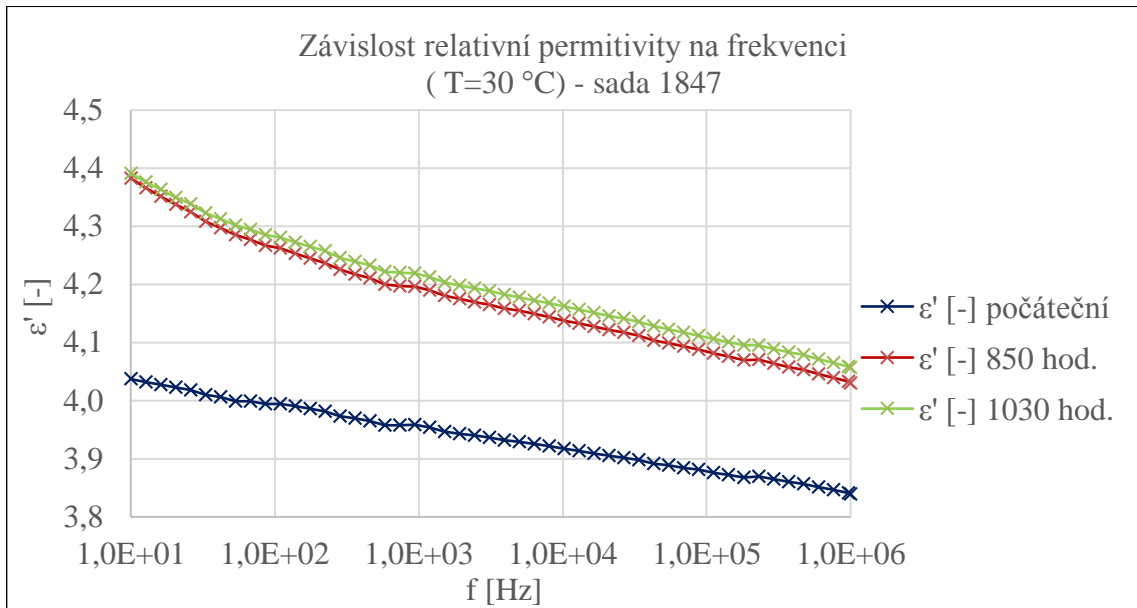


Obrázek 1: Závislost relativní permitivity na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1848

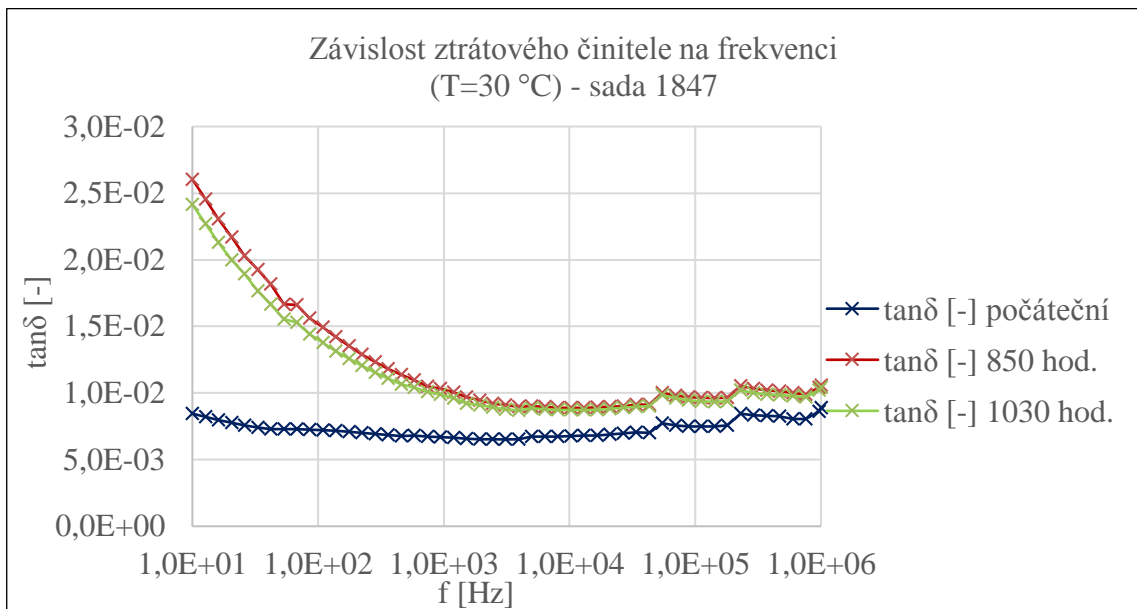


Obrázek 2: Závislost ztrátového činitele na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1848

B. 2 Sada vzorků 1847 (T=30 °C)

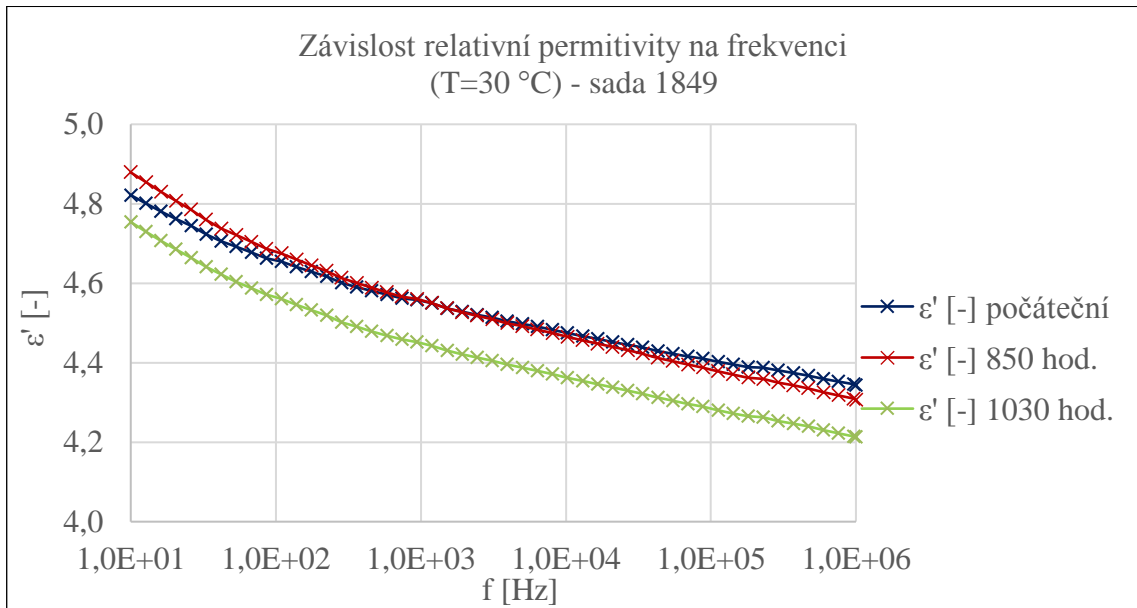


Obrázek 3: Závislost relativní permitivity na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1847

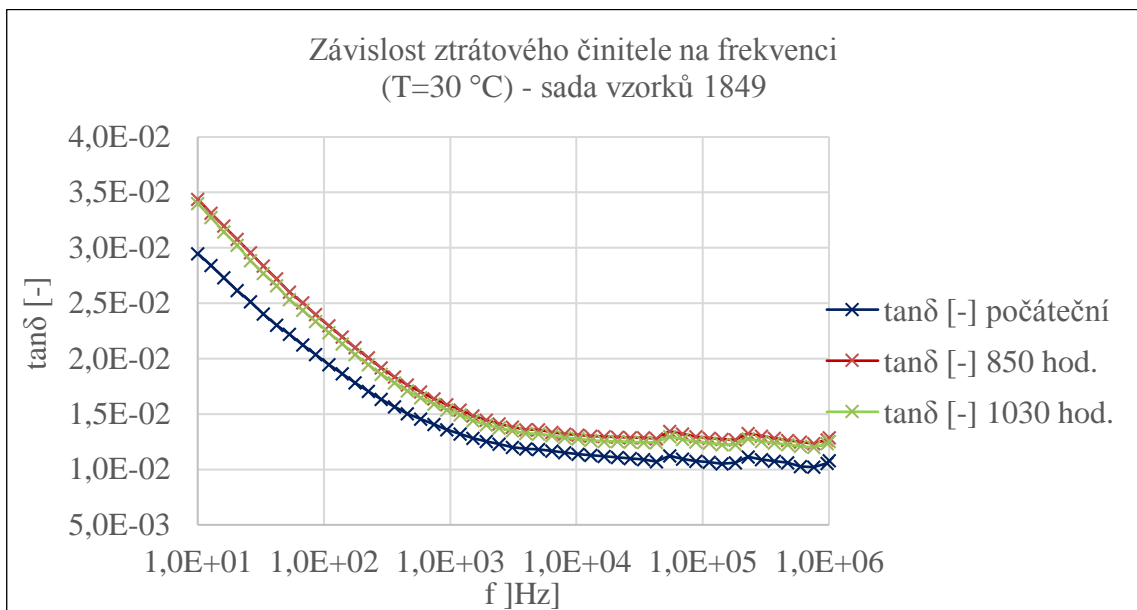


Obrázek 4: Závislost ztrátového činitele na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1847

B. 3 Sada vzorků 1849 (T=30 °C)

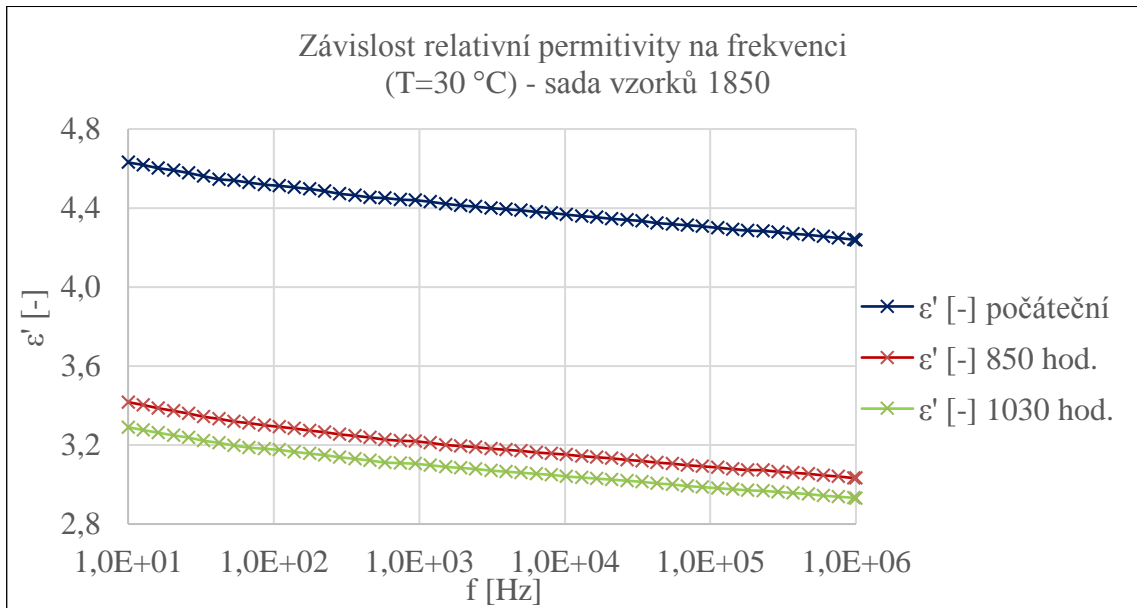


Obrázek 5: Závislost relativní permitivity na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1849

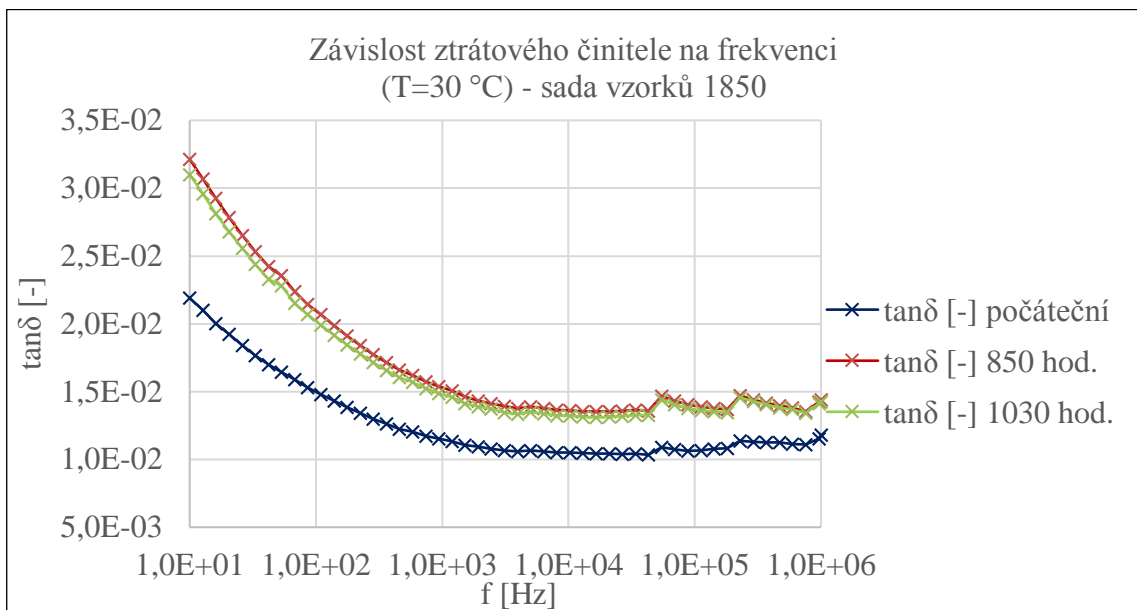


Obrázek 6: Závislost ztrátového činitele na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1849

B. 4 Sada vzorků 1850 (T=30 °C)

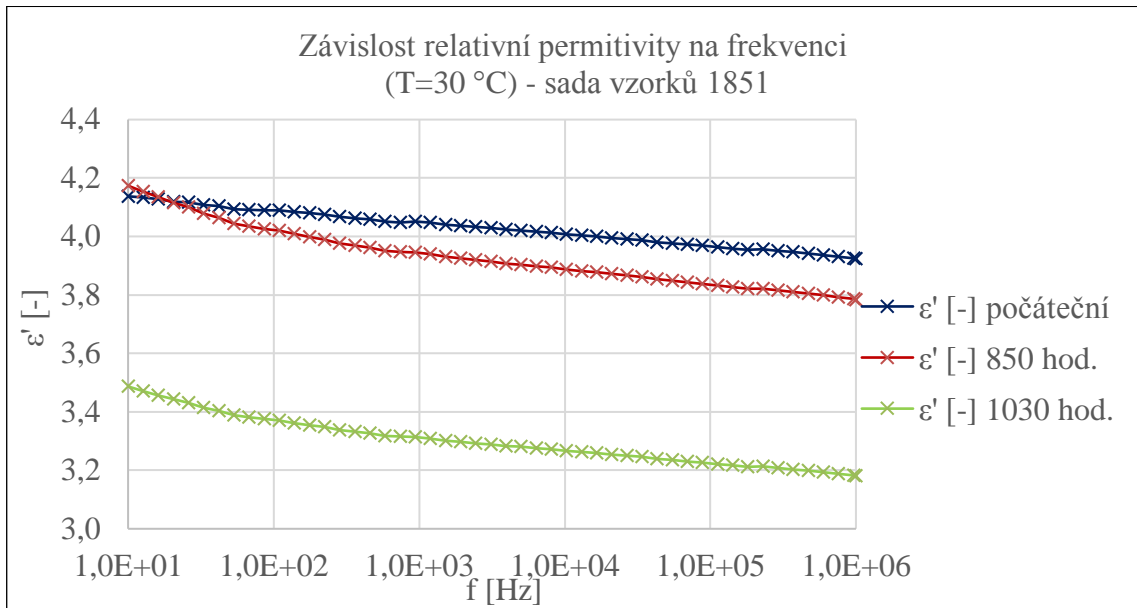


Obrázek 7: Závislost relativní permitivity na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1850

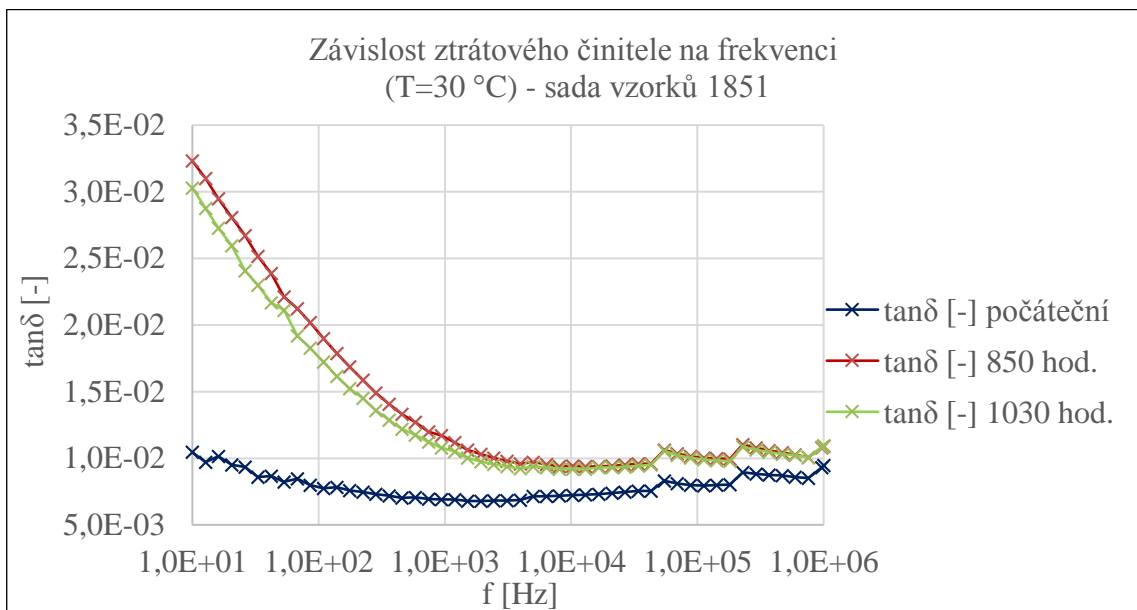


Obrázek 8: Závislost ztrátového činitele na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1850

B. 5 Sada vzorků 1851 (T=30 °C)



Obrázek 9: Závislost relativní permitivity na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1851



Obrázek 10: Závislost ztrátového činitele na frekvenci (T=30 °C) pro sadu vzorků 1851